



Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza

Instituto de Geociências

**CASOS DE CHUVAS EXTREMAS NO RIO DE JANEIRO:
ESTABELECIMENTO DE LIMIARES PARA INDICADORES
ATMOSFÉRICOS**

Fabricio Polifke da Silva

Orientadora: D.Sc. Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Meteorologista.

Rio de Janeiro, RJ

Setembro, 2011

CASOS DE CHUVAS EXTREMAS NO RIO DE JANEIRO: ESTABELECIMENTO DE LIMIARES
PARA INDICADORES ATMOSFÉRICOS

Fabício Polifke da Silva

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Meteorologista.

Aprovada por:

Prof.^a Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva (D. Sc.)

Prof. Wallace Figueiredo Menezes (D. Sc.)

Prof. Alfredo Silveira da Silva (M. Sc.)

Prof.^a Priscila da Luz Barcellos (M. Sc.)

Rio de Janeiro, RJ

Setembro, 2011

CASOS DE CHUVAS EXTREMAS NO RIO DE JANEIRO: ESTABELECIMENTO DE
LIMIARES PARA INDICADORES ATMOSFÉRICOS

POLIFKE DA SILVA, FABRICIO
CASOS DE CHUVAS EXTREMAS NO
RIO DE JANEIRO: ESTABELECIMENTO
DE LIMIARES PARA INDICADORES
ATMOSFÉRICOS

XII, 66 p. 29,7 cm (UFRJ, 2011)

Monografia - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Departamento de
Meteorologia

1. Chuvas extremas
2. Indicadores atmosféricos
3. Mesoescala

“Porque a loucura de Deus é mais sábia
do que a sabedoria humana,
e a fraqueza de Deus é mais forte
que a força do homem.”

(II Co. 1:25)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela graça que me foi concedida desde o momento em que tive existência. Agradeço por tantas vezes em que foi a única pessoa que pôde me trazer paz e alegria nos momentos mais difíceis ao longo desta grande jornada chamada vida.

A toda minha família pelo amor, cuidado, carinho e palavras de ânimo que me fizeram hoje estar aqui. Agradeço muito a minha mãe, Dália Polifke, por toda paciência e amor nos últimos cinco anos que praticamente vivi mais ausente do que presente no convívio familiar. Agradeço minha avó, irmão, cunhada, tios e ao meu sobrinho Igor que tantas vezes com seu jeitinho inocente me fez rir.

A minha orientadora e mãezona Justi, por me “trazer para fora”. Por tantas vezes ter acreditado mais em mim do que eu mesmo. Por não ter me ensinado a fazer pesquisa, mas a ser pesquisador. Por todos os momentos em que mesmo estando ocupadíssima, sempre me acolheu e me deu inúmeros conselhos que nunca vou esquecer.

Aos Meteorologistas David e Tozzi por todo o suporte técnico dado para que este trabalho fosse realizado.

A todos os professores do Departamento de Meteorologia da UFRJ por contribuírem para minha formação.

Aos meus amigos da graduação Wanderson, Fábio, Suzanna, Ian, Bia, Karina, Carlos e Thábata por tantas vezes ter suportado a minha personalidade um pouco “difícil” (rs) e por sempre estarem ao meu lado. Aos veteranos e calouros mais chegados também agradeço.

Aos amigos mais recentes da Infraero que neste último ano de graduação tanto me ensinaram e me motivaram no meu período de vigência do estágio, em especial, a Priscila Luz.

Por todos os amigos que não citei aqui, mas que certamente fizeram parte construtiva na minha vida.

RESUMO

CASOS DE CHUVAS EXTREMAS NO RIO DE JANEIRO: ESTABELECIMENTO DE LIMIARES PARA INDICADORES ATMOSFÉRICOS

Este trabalho consiste no estabelecimento de limiares para indicadores atmosféricos nos dias de ocorrência de grandes acumulados diários de precipitação, denominados, neste trabalho, chuvas extremas. O objetivo é caracterizar valores destes indicadores especificamente para o Município do Rio de Janeiro, a fim de que quando previstos pelos modelos numéricos representem de forma adequada os padrões dinâmicos e termodinâmicos favoráveis a ocorrência de chuvas extremas sobre a região e possam auxiliar os meteorologistas operacionais no chamado “momento de alerta”. Para desenvolver o estudo foi utilizado o banco de dados de precipitação das trinta estações da Fundação Georio no período de 1997-2008. A partir destes dados, métodos estatísticos foram usados para que pudessem ser estabelecidos limiares de precipitação acumulada diária que caracterizassem a ocorrência de chuvas extremas, sendo então estabelecidos 84 casos de chuvas extremas ocorridas no Município do Rio de Janeiro. Visto que os modelos numéricos da atmosfera subestimam a quantificação da precipitação, os indicadores de chuvas extremas foram analisados nos dias de ocorrência destes casos. São considerados indicadores atmosféricos de chuvas extremas neste trabalho: índice K, índice TT, índice CK, índice CITT, gradiente vertical de temperatura entre 500 e 700hPa, divergência em 850hPa, divergência em 250hPa, movimento vertical em 500hPa e pressão ao nível médio do mar. Os resultados mostraram que estes índices são ferramentas úteis na identificação e caracterização dos sistemas que possam originar grandes acumulados de precipitação sobre o Município. Foram usados os quartis superior e inferior destes indicadores com o objetivo de estabelecer limiares que caracterizassem as condições para a ocorrência de chuvas extremas sobre a região. Verificou-se que os limiares corresponderam de forma mais precisa do que os valores já pré-estabelecidos pela literatura para estes indicadores, dando suporte mais adequado na identificação dos locais mais propícios a formação de sistemas convectivos mais intensos que possam gerar grandes acumulados de precipitação sobre o Município do Rio de Janeiro.

ABSTRACT

EXTREMES RAINFALL CASES OVER RIO DE JANEIRO: ESTABLISHMENT OF ATMOSPHERIC INDICATORS THRESHOLDS

This work consists of establishing thresholds for atmospheric indicators in the days of the occurrence of large accumulated daily rainfall, named in this work as extreme rainfall. The objective is to characterize the values of these indicators, specifically for the municipality of Rio de Janeiro, so that, when forecasted by numerical models, they represent properly the dynamic and thermodynamic patterns favorable to the occurrence of extreme rainfall over the region and can assist operational forecasters in the "warning time". In order to develop the study, a database of precipitation from thirty stations of the Foundation Georio in the period 1997-2008 were used. Statistical tests were conducted throughout this dataset so that daily rainfall thresholds that characterized the occurrence of extreme rainfall could be established, once it was done, 84 cases of extreme rainfall were found in the municipality of Rio de Janeiro. Since the numerical models of the atmosphere underestimate the quantification of precipitation, extreme rainfall indicators were analyzed in the days of occurrence of these cases. The following variables are considered indicators of extreme rainfall in this work: K index, TT index, CK index, CITT index, Lapse-Rate between (500-700) hPa, 850hPa convergence, 250hPa divergence, 500hPa vertical movement and sea level pressure. The results showed that these indexes are useful tools when it comes to identifying and characterizing systems that can to large accumulated precipitation over the city. Statistical tests were conducted throughout this indicators in order to establish thresholds that characterize the atmospheric conditions for the occurrence of extreme rainfall over the region. It was found that the thresholds represented more accurately than the default values for these indicators which supports better the identification of the places which are more prone to form more intense convective systems that lead to a large accumulated precipitation over the Rio de Janeiro.

ÍNDICE TEMÁTICO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1– Índices de Instabilidade.....	9
2.1.1 – Índice K.....	9
2.1.2 – Índice TT.....	10
2.1.3 – Taxa de Variação Vertical da Temperatura Ambiental (“Lapse- Rate” – LR).....	11
2.1.4 – Índice CK.....	11
2.1.5 – Índice CITT.....	13
3. METODOLOGIA	14
3.1 – Determinação dos casos de chuvas extremas	14
3.2 – Análise da precipitação simulada pelo modelo WRF.....	18
4. RESULTADOS.....	21
4.1. Casos.....	21
4.1.1. Caso 11 de fevereiro de 1998.....	21
4.1.2. Caso 21 de março de 2003.....	24
4.1.3. Caso de 19 de maio de 2007.....	28
4.2. Resultados estatísticos.....	31
4.2.1. Indicadores atmosféricos de chuvas extremas.....	32
4.2.1.1. Caso 11/02/1998.....	32
4.2.1.2. Caso 21/03/2003.....	37
4.2.1.3. Caso 19/05/2007.....	41

4.2.2. Limiares para os indicadores de chuvas extremas.....	45
4.3 – Campos dos indicadores atmosféricos de chuvas extremas simulados pelo modelo WRF.....	50
4.3.1 – Análise dos resultados dos indicadores atmosféricos.....	50
4.3.1.1 – Índice CK.....	50
4.3.1.2 – Índice CITT.....	53
4.3.1.3 – Índice K.....	55
4.3.1.4 – Índice TT.....	58
4.3.1.5 – Índice LR (500-700)hPa.....	61
4.3.1.6 – Divergência em 850hPa.....	63
4.3.1.7 – Divergência em 250hPa.....	65
4.3.1.8 – Movimento Vertical em 500hPa.....	66
4.3.1.9 – Pressão ao Nível Médio do Mar.....	67
5. CONCLUSÕES.....	68
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1:	Área sobre a qual foram simulados os casos de chuvas extremas no período de 1997-2008.....	17
Figura 3.2:	Pontos de grade da simulação sobre o município do Rio e Janeiro usados para a comparação com as estações de observação de Anchieta, Santa Cruz, Itaúna, Tijuca e Copacabana.....	18
Figura 3.3:	Imagem do satélite GOES-08 no canal infravermelho para o dia (a) 11 de fevereiro de 1998 às 18Z. e (b) 12 de fevereiro de 1998 às 00Z.....	19
Figura 3.4:	Precipitação acumulada simulada pelo modelo WRF para o dia (a) 11 de fevereiro e (b) 12 de fevereiro de 1998.....	20
Figura 3.5:	Evolução da precipitação acumulada simulada (SM) e observada (OB) para o dia 11 de fevereiro de 1998 pelo modelo WRF para os bairros (a) Anchieta, (b) Copacabana, (c) Itaúna, (d) Santa Cruz e (e) Tijuca.....	20
Figura 3.6:	Imagem de satélite Retangular CH 4 no canal infravermelho para o dia (a) 23 de março de 2003 às 21Z e (b) 22 de março de 2003às 00Z . (Fonte: CPTEC).....	21
Figura 3.7:	Imagens do Satélite GOES-8 canal infravermelho, realçadas e setorizadas do dia 21 de março de 2003 nos horários das 19:45Z (a), 20:45Z (b), 22:15Z(c) e 23:45Z(d). (Fonte: FURNAS).....	22

Figura 3.8:	Precipitação acumulada simulada pelo modelo WRF para o dia (a) 23 de março e (b) 24 de março de 2003.....	24
Figura 3.9:	Evolução da precipitação acumulada simulada (SM) pelo modelo WRF e observada (OB) para o dia 20, 21 e 22 de março de 2003 para os bairros (a) Anchieta, (b) Copacabana, (c) Itaúna, (d) Santa Cruz e (e) Tijuca.....	24
Figura 3.10:	Imagens do Satélite GOES-8 canal infravermelho setorizadas do dia 19 de maio de 2007 nos horários das 12:15Z (a) e 18:15Z (b) (Fonte: CPTEC/INPE).....	25
Figura 3.11:	Precipitação acumulada simulada pelo modelo WRF para o dia (a) 19 de maio e (b) 20 de maio de 2007.....	25
Figura 3.12:	Evolução temporal da precipitação acumulada observada (OB) e simulada (SM) para os bairros no período de 18 a 20 de maio de 2007 em (a) Anchieta, (b) Copacabana, (c) Itaúna, (d) Santa Cruz (e) Tijuca.....	26
Figura 4.1:	Pontos onde foram calculados os indicadores atmosféricos de chuvas extremas.....	27
Figura 4.2:	Evolução temporal do índice K para o caso 11/02/1998.....	28
Figura 4.3:	Evolução temporal do índice TT para o caso 11/02/1998.....	28

Figura 4.4:	Evolução temporal do LR para o caso 11/02/1998.....	29
Figura 4.5:	Evolução temporal da pressão ao NMM para o caso 11/02/1998.....	29
Figura 4.6:	Evolução temporal do Movimento Vertical em 500 hPa para o caso 11/02/1998.....	30
Figura 4.7:	Evolução temporal da Divergência do vento em 850 hPa para o caso 11/02/1998.....	31
Figura 4.8:	Evolução temporal da Divergência do vento em 250 hPa para o caso 11/02/1998.....	31
Figura 4.9:	Evolução temporal do índice K para o caso 21/03/2003.....	32
Figura 4.10:	Evolução temporal do índice TT para o caso 21/03/2003.....	32
Figura 4.11:	Evolução temporal do índice LR para o caso 21/03/2003.....	33
Figura 4.12:	Evolução temporal da Pressão ao Nível médio do mar para o caso 21/03/2003.....	33
Figura 4.13:	Evolução temporal do Movimento Vertical em 500hPa para o caso 21/03/2003.....	34
Figura 4.14:	Evolução temporal da Divergência do vento em 850hPa para o caso 21/03/2003.....	34

Figura 4.15:	Evolução temporal da Divergência do vento em 250hPa para o caso 21/03/2003.....	35
Figura 4.16:	Evolução temporal do índice K para o caso 19/05/2007.....	37
Figura 4.17:	Evolução temporal do índice TT para o caso 19/05/2007.....	37
Figura 4.18:	Evolução temporal do LR para o caso 19/05/2007.....	38
Figura 4.19:	Evolução temporal da Pressão ao nível médio do mar para o caso 19/05/2007.....	38
Figura 4.20:	Evolução temporal do Movimento Vertical em 500hPa para o caso 19/05/2007.....	39
Figura 4.21:	Evolução temporal da Divergência do vento em 850hPa para o caso 19/05/2007.....	40
Figura 4.22:	Evolução temporal da divergência do vento em 250hPa para o caso 19/05/2007.....	40
Figura 4.23:	Índice CK às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22:00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (sem limiares).....	42

Figura 4.24:	Índice CK às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22.00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (com limiares).....	42
Figura 4.25:	Índice CITT às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22.00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (sem limiares).....	48
Figura 4.26:	Índice CITT às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22.00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (com limiares).....	49
Figura 4.27:	Índice K às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22.00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (sem limiares).....	
Figura 4.28:	Índice K às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22.00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (com limiares).....	
Figura 4.29:	Índice TT às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22.00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (sem limiares).....	50
Figura 4.30:	Índice TT às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22.00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (com limiares).....	51
Figura 4.31:	LR às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22.00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (sem limiares).....	52

Figura 4.32:	LR às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22.00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (com limiares).....	53
Figura 4.33:	CONV às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22.00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (com limiares).....	
Figura 4.34:	CONV às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22.00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (com limiares).....	
Figura 4.35:	Divergência em 250hPa às 20:00Z (a) (a), 21:00Z (b), 22.00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF.....	54
Figura 4.36:	Movimento Vertical em 500hPa às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22.00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF.....	55
Figura 4.37:	Pressão ao nível médio do mar às 20:00Z (a) (a), 21:00Z (b), 22.00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF.....	56

ÍNDICE DE SIGLAS

AFWA	Air Force Weather Agency
CITT	Convergência do índice TT em 850hPa
CK	Convergência do índice K em 850hPa
CONV	Convergência em 850hPa
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CT	Cross Totals
DIV	Divergência em 250hPa
FAA	Federal Aviation Administration
FSL	Forecast Systems Laboratory
GEORIO	Instituto de Geotécnia do Rio de Janeiro
GePac	Grupo de Estudos, Previsões e Análises Climáticas
GOES	Geostationary Operational Environmental <i>Satellite</i>
GrADS	Grid Analysis and Display System
K	Índice K
LR	Lapse-Rate (Taxa de Variação Vertical da Temperatura)
MM5	Fifth-Generation Mesoscale Model

MV	Movimento Vertical em 500hPa
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NRL	Naval Research Laboratory
NSSFC	National Severe Storms Forecast Center
PEAO	Plataforma de Experimentos Ambientais OnDemand
PNMM	Pressão ao nível médio do mar
RAMS	Regional Atmospheric Modeling System
SCMs	Sistemas Convectivos de Mesoescala
TT	Índice Total Totals
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
VT	Vertical Totals
WRF	Weather Research and Forecasting
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento e previsão dos sistemas convectivos associados a grandes acumulados de precipitação (chuvas extremas) tem mostrado ser de vital importância ao longo dos anos, pois esses sistemas são responsáveis por enchentes, deslizamentos de encostas, alagamentos e desligamentos da rede elétrica, trazendo transtornos às atividades humanas e, muitas vezes, até perdas de vidas. Essas consequências são particularmente importantes sobre as regiões Sul e Sudeste, onde se concentram grande parte da população do país, das atividades produtivas na indústria e no comércio, os principais reservatórios que produzem energia elétrica, muitas linhas de transmissão de energia, além de muitas estradas e portos por onde escoam a produção agrícola dessas regiões e da parte central do país.

Especificamente para o Município do Rio de Janeiro, região circundada por encostas e com significativas bacias hidrográficas passando por seu interior, as previsões de eventos meteorológicos que possam causar grandes acumulados de precipitação são indispensáveis para a segurança e a manutenção da vida da população.

Verifica-se que os modelos numéricos da atmosfera, em geral, subestimam a quantificação da precipitação (PEREIRA (2004), NASCIMENTO (2005) & BARCELLOS (2009)), uma das variáveis que melhor caracterizaria eventos de chuvas extremas, pois necessitam de altíssima resolução espacial e alimentação das condições iniciais e de contorno com uma rede de dados observados que nos dias atuais ainda não é suficiente para o cálculo das integrações nos modelos, dificultando assim, a previsão de sua intensidade associadas aos sistemas convectivos.

Um dos meios pelos quais tem se obtido resultados satisfatórios é o uso dos índices de instabilidade (ou indicadores do tempo severo), ferramentas de grande uso para a identificação de sistemas de caráter extremo que possam nascer e se desenvolver sobre diferentes regiões, podendo ocasionar grandes acumulados de precipitação. Os índices de instabilidade são mais eficientes na identificação de sistemas que causam chuvas extremas, pois são calculados a partir de variáveis atmosféricas básicas (como, por exemplo, pressão, temperatura do ar, vento e umidade do ar) não necessitando assim, de modelos com altíssima resolução espacial e sem dependência com as complicadas parametrizações de nuvens.

Ao longo dos anos, diversos estudos como MENEZES *et al* (2000), MOURÃO *et al* (2003), TOMAZIELLO & GANDU (2006), GUIA *et al* (2006), GROSSMAN (2010), mostraram bons resultados na aplicação dos índices de instabilidade em diferentes tipos de sistemas que produziram dessemelhantes danos à população, mas grande parte dos mesmos foram estudos de casos isolados de diferentes sistemas para regiões distintas, dificultando assim o estabelecimento de limiares práticos destes índices que possam qualificar e quantificar a identificação do disparo destes sistemas para regiões específicas.

O objetivo deste trabalho é analisar casos de chuvas extremas sobre o Município do Rio de Janeiro no período de 1997-2008, realizar os cálculos dos indicadores de tempo severo a partir das simulações feitas pelo modelo Weather Research and Forecasting (WRF - MICHALAKES, *et al.*, 2001) buscando o estabelecimento de limiares que caracterizem o comportamento destes indicadores para o Município, como um auxílio na diminuição dos “alarmes falsos” e aumento na certeza das características termodinâmicas e dinâmicas responsáveis por chuvas extremas e sua previsibilidade. Para ta foi utilizado o modelo WRF neste trabalho por ser considerado um modelo de previsão numérica da próxima geração, pois além de ser flexível quanto à sua instalação e configuração física e numérica, pode ser utilizado em diversas escalas que podem ir de apenas alguns metros até milhares de quilômetros.

Segundo BARCELLOS (2009), os sistemas de alertas meteorológicos precisam agir como principal ferramenta no combate a danos humanos e físicos, em que o aperfeiçoamento de meios e métodos das previsões é de suma importância para o sucesso dessa operação. Sendo assim, espera-se que os resultados destes limiares práticos possam contribuir de forma qualitativa e quantitativa numa identificação mais localizada e probabilisticamente favorável na gênese e evolução destes sistemas quando simulados pelos modelos numéricos da atmosfera, auxiliando à previsão e aos meteorologistas no chamado “momento de alerta”.

No capítulo 2 é apresentada uma breve revisão bibliográfica dos estudos sobre tempestades severas, modelagem numérica de sistemas convectivos e indicadores de tempo severo modelados. No capítulo 3 encontra-se a descrição da metodologia utilizada neste estudo, uma síntese do modelo WRF e a descrição da precipitação simulada e observada em três casos que serão discutidos neste trabalho. No capítulo 4

os resultados dos indicadores de chuvas extremas encontrados na modelagem são apresentados e discutidos. E o capítulo 5 segue com as conclusões e considerações finais do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo JOHN & DOSWELL (1992), a definição de tempestade severa utilizada pelo Centro Nacional de Previsão de Tempo Severo (NSSF) é aquela onde os seguintes fenômenos são verificados: tornados, ventos fortes ou rajadas ($> 26\text{ms}^{-1}$ (50kt)) e granizos com diâmetro acima de 1.9cm.

No trabalho de MILLS & COLQUHOUN (1998), a definição de tempestade severa utilizada na Austrália é aquela em que uma tempestade produza no mínimo um dos seguintes parâmetros: rajadas de vento de ao menos 90 km/h, granizo de ao menos 2 cm de diâmetro à superfície ou um tornado. Chuvas fortes ou enchentes também são incluídas na definição. A não ser pelas chuvas fortes e as enchentes, a definição é quase idêntica à usada nos Estados Unidos.

NASCIMENTO (2005) ressalta que tais limiares para tamanho de granizo e velocidade do vento indicados na definição de JOHN & DOSWELL (1992) são um tanto quanto arbitrários pelo fato de estarem baseados em relatos de condições de tempo na América do Norte (em latitudes médias) e por isso, esta não deva ser a única (ou melhor) definição de tempestade severa para o Brasil. Segundo NASCIMENTO (2005) esta definição de tempestades severas utilizando tais parâmetros continua sendo válida para a grande região tropical do país, onde fenômenos convectivos de significativo impacto social e econômico são registrados anualmente, em particular envolvendo altas taxas de precipitações e inundações, mas um questionamento deixado pelo autor será discutido neste trabalho: “Uma discussão sobre a definição do que é uma tempestade severa dentro do contexto brasileiro é desejável. Por exemplo, as tempestades típicas de verão que geram grande volume de precipitação e inundações repentinas deveriam ser consideradas como severas? Mesmo que suas correntes verticais não sejam tão intensas como em uma tempestade severa clássica de latitudes médias?”

Segundo MENEZES *et al* (2000) o Município do Rio de Janeiro, durante o verão, é atingido freqüentemente por sistemas meteorológicos que promovem grandes acumulados de precipitação. Tais eventos causam transtornos econômicos e sociais de forte magnitude que justificam estudos mais aprofundados sobre a causa dos mesmos. Grande parte destes sistemas está compreendida no conjunto denominado de sistemas convectivos de

mesoescala (SCMs), sendo capazes algumas vezes de ocasionar eventos de precipitação e tempo severo mais intensos do que os provenientes de sistemas frontais.

Os parâmetros convectivos para a classificação de uma tempestade como **severa** são dependentes de diversos fatores que estão condicionados ao grau de destruição que os sistemas atmosféricos produzem sobre as regiões que atuam nos dias de sua ocorrência. Nas latitudes médias, os sistemas que produzem grandes danos à população estão, normalmente, associados aos parâmetros de destruição que são verificados naquelas regiões, como, por exemplo, ocorrência de granizo, mas que, geralmente, não são verificados com tanta frequência nas latitudes tropicais. Por este fato, pode-se concluir então que nas latitudes tropicais não existe a ocorrência de tempestades severas pelo fato destes parâmetros convectivos pré-estabelecidos para as latitudes médias não serem verificados nas regiões tropicais? E com relação ao grau de destruição? Será que os sistemas meteorológicos que causam destruição e danos à população, por exemplo, no Município do Rio de Janeiro, deveriam ser desconsiderados por não satisfazerem a classificação de JOHN & DOSWELL (1992)? A inclusão da precipitação como um limiar na classificação de um sistema de caráter extremo como tempestade severa é válido como proposto por NASCIMENTO (2005)?

Em concordância com o proposto por NASCIMENTO (2005), este trabalho justifica a consideração de que tempestades severas são também aquelas capazes de produzir acumulados significativos de precipitação diários (chuvas extremas) ou horários (chuvas intensas), enchentes e até mesmo deslizamento de encostas.

Sendo assim, especificamente, considera-se que para o Município do Rio de Janeiro, as tempestades severas são aquelas que produzem grandes acumulados de precipitação, denominados neste trabalho, chuvas extremas. Tais acumulados são um dos maiores problemas que a população residente enfrenta todos os anos, pois promovem enchentes, deslizamentos de encostas e inúmeros outros danos, entre os mais significantes está a perda de vidas. Portanto, o conhecimento do comportamento da precipitação observada na região e a avaliação das simulações da mesma através dos modelos numéricos da atmosfera são essenciais para a identificação de possíveis ocorrências destes grandes acumulados sobre o Município do Rio de Janeiro. Estudos de caso através de simulações numéricas como PEREIRA (2004), MOURÃO (2007) e POLIFKE DA SILVA & JUSTI DA SILVA (2010) mostraram que a precipitação não é bem simulada pelos modelos

numéricos da atmosfera. Tais estudos mostraram que a precipitação é uma variável que ainda não aponta bons resultados quando comparadas com a precipitação observada em determinados eventos meteorológicos de caráter extremo. Verificou-se que para alguns casos, os modelos numéricos conseguem até gerar um comportamento similar da precipitação simulada em relação à precipitação observada, mas ainda assim é subestimada pelos modelos. Como dito anteriormente, acredita-se que um dos motivos seja o fato de que a precipitação ser uma variável resultante de diversas parametrizações que ainda não são bem resolvidas nos modelos e pelo fato de necessitarem de uma altíssima resolução espacial e alimentação das condições iniciais e de contorno que estão aquém do que se é disponível nos dias atuais.

Estudos com o uso dos índices de instabilidade nas ocorrências de tempestades severas têm mostrado resultados satisfatórios ao longo dos últimos anos, e têm sido ferramentas de grande uso para a identificação de sistemas de caráter extremo que possam se originar e desenvolver sobre regiões distintas.

Segundo SILVA DIAS (2000), os índices de instabilidade baseados em perfis verticais de temperatura, umidade e vento são usados para sintetizar algumas características termodinâmicas e de cisalhamento vertical do vento típicas de situações convectivas. Dentre as situações convectivas distinguem-se duas categorias:

- Grandes acumulados de chuvas, sem granizo e com vento moderado. São em geral chuvas mais prolongadas provenientes de sistemas estacionários ou de séries sucessivas de sistemas que tem trajetória semelhante.
- Grandes intensidades de chuvas, queda de granizo e fortes ventanias. Em geral, as células convectivas têm deslocamento bem definido e não produzem grandes acumulações de chuva; há possibilidade de rajadas intensas, micro-explosões e tornados, porém cada caso tem que ser monitorado de perto. Estas tempestades são denominadas tempestades severas.

Por isso, verifica-se que o uso dos índices de instabilidade na ocorrência tempestades severas em que altas taxas de precipitação são observadas é extremamente válido como um auxílio na identificação e previsão dos sistemas que possam se originar, desenvolver e deslocar causando estes grandes acumulados de precipitação e inúmeros outros danos sobre o Município do Rio de Janeiro.

Neste trabalho, considera-se indicadores atmosféricos de chuvas extremas (a) a pressão ao nível médio do mar (PNMM), (b) o movimento vertical em 500 hPa (MV), (c) a divergência do vento em 850 hPa (CONV), (d) a divergência do vento em 250 hPa (DIV) e os índices de instabilidade (e) K, (f) Total Totals (TT), (g) Taxa de Variação vertical d temperatura ambiental entre 500 e 700 hPa (“Lapse-Rate” – LR) e os índices (h) CK e (i) CITT, esses dois últimos obtidos pelo cálculo da convergência dos índices K e TT na baixa troposfera. Os índices CK e CITT têm a vantagem de combinar aspectos termodinâmicos e dinâmicos, isto é, os índices de instabilidade K e TT são associados à convergência, posicionando melhor os sistemas de chuvas extremas. Posteriormente, procurou-se o estabelecimento de limiares destes índices para o município do Rio de Janeiro.

No Brasil, os trabalhos de BENETTI & SILVA DIAS (1986), MENEZES (1998), SILVA DIAS (2000), OLIVEIRA *et al* (2002) LIMA (2005), TOMAZIELLO & GANDU (2006), NASCIMENTO (2005), MENEZES *et al* (2000), MOURÃO *et al* (2003), GUIA *et al* (2006), GROSSMAN (2010) ESCOBAR & ANDRADE (2010), NASCIMENTO *et al* (2010), mostraram bons resultados na aplicação dos índices em diferentes tipos de sistemas, mas grande parte dos mesmos foram “estudos de caso” de diferentes sistemas para regiões distintas, não podendo-se estabelecer, assim, limiares práticos que possam qualificar e quantificar a identificação do disparo destes sistemas mesmo sobre tais regiões. Segundo NASCIMENTO (2005), há a necessidade de se expandir estes estudos para diferentes regiões do país, avaliar a utilidade de modelos numéricos de mesoescala (e rotinas de mesoanálise objetivas) em fornecer estes parâmetros em um ambiente favorável no Brasil.

O Grupo de Estudos, Previsões e Análises Climáticas do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (GePaC/UFRJ) desenvolveu um sistema de simulação de clima regional aninhando o modelo de área limitada denominado Weather Research and Forecasting Model (WRF) (MICHALAKES *et al.*, 2001), ao modelo de circulação geral da atmosfera do NCEP/NCAR (modelo global, KISTLER, *et al.*, 2001 e KALNAY, *et al.*, 1996). Esta é uma técnica de aninhamento “*one-way*” na qual as reanálises produzidas pelo modelo global fornecem características apropriadas da circulação de grande escala em resposta aos forçamentos climáticos globais, enquanto que o modelo atmosférico de mesoescala, no caso o WRF, responde aos efeitos na escala sub-

grade devidos, por exemplo, à presença de corpos d'água, características da vegetação, topografia e contornos costeiros, fatores extras que influenciam diretamente as características do clima local.

O uso de modelos de mesoescala como o RAMS, o ETA e o MM5, para “*downscaling*” climático, vem sendo feito com sucesso (GIORGI & BI, 2000; QIAN *et al*, 2003; PESQUERO *et al*, 2009). Neste tipo de abordagem o modelo de mesoescala, não é livremente integrado a longo prazo, já que o “*nudging*” feito com os dados das reanálises do NCEP/NCAR garante um parcial controle da atmosfera modelada em grande escala, enquanto que o modelo regional atende parcialmente às condições locais determinadas pela topografia, corpos d'água e cobertura vegetal, que são incorporados ao modelo com detalhamento de alta resolução. Portanto, estas características fisiográficas do estado do Rio de Janeiro se constituíram nas condições de contorno inferiores das simulações. Optou-se pelo uso do modelo WRF pelas razões já expostas e pode ser utilizado em diversas escalas que podem ir de apenas alguns metros até milhares de quilômetros e pode atender a finalidades do tipo: simulações idealizadas (convecção, ondas baroclínicas, etc.), pesquisa de parametrizações, pesquisa de assimilação de dados, pesquisa em previsão de tempo, acoplamentos entre modelos de aplicações diferentes (atmosfera-ondas, atmosfera-poluição, etc.) e ensino.

O WRF permite realizar simulações com dados reais ou idealizados e é considerado muito eficiente em termos computacionais, com uma arquitetura de *software* pronta para paralelismo. O modelo é um esforço conjunto de diversas entidades, a NCAR (*National Center for Atmospheric Research*), a NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), o NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*), o FSL (*Forecast Systems Laboratory*), a AFWA (*Air Force Weather Agency*), o NRL (*Naval Research Laboratory*), a Universidade de Oklahoma e a FAA (*Federal Aviation Administration*). Além das instituições citadas, o WRF tem uma crescente comunidade de usuários, e é usado operacionalmente por vários centros, inclusive o NCEP. A versão do WRF usada neste trabalho é a ARW 2.2 e usa o módulo WRF *Pre-Processing System* (WPS) para o pré-processamento. Informações adicionais e detalhadas sobre o modelo WRF, suas versões, opções e fóruns de discussão podem ser acessadas no site do manual do usuário do modelo (<http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>) e na página principal do projeto WRF (<http://www.wrf-model.org>).

As opções físicas do WRF são contidas em seis categorias: (1) microfísica, (2) parametrização de cúmulos, (3) camada superficial (4) modelo solo-superfície, (5) camada limite planetária e (6) radiação. Em cada uma destas categorias estão incluídas várias opções.

2. 1. Índices de Instabilidade

2.1.1. Índice K

O índice K é definido como (GEORGE, 1960):

$$K = (T_{850} + Td_{850}) - (T_{700} - Td_{700}) - T_{500} \quad (^\circ\text{C})$$

onde, T e Td referem-se às temperaturas do bulbo seco e do ponto de orvalho, respectivamente, e os subscritos indicam os níveis de pressão (em hPa) correspondentes.

Definido pela soma das temperaturas de bulbo seco e ponto de orvalho em 850 hPa, subtraída da depressão do ponto de orvalho em 700 hPa e da temperatura de bulbo seco em 500 hPa, o índice K tende a melhor captar condições favoráveis à ocorrência de tempestades em ambientes úmidos em toda a troposfera, como é típico de ambientes tropicais (NASCIMENTO, 2005).

Para que o Índice K seja significativo é necessário que exista calor em baixos níveis e umidade disponível desde a superfície até 700 hPa. Uma camada seca em 700 hPa reduz o valor de K (SILVA DIAS, 2000). Conseqüentemente, o índice K não é um bom indicador para avaliar atmosferas favoráveis a formação de tempestades severas com ventos fortes, pois estas são associadas com a presença de uma camada de ar seco em níveis médios. Logo, o índice K é um indicador mais consistente para determinar apenas condições de chuvas fortes e não ventanias, sendo que maiores valores de K significam maiores chances de chuvas intensas.

Valores de K acima de 30°C são considerados altos (alto potencial para a ocorrência de tempestades), e acima de 40°C são extremamente altos (potencial extremo para tempestade). (HENRY, 1987 *apud* NASCIMENTO, 2005).

2.1.2. Índice Total Totals (TT)

O índice Total Totals é definido por (MILLER, 1972):

$$TT = T_{850} + Td_{850} - 2 * T_{500} \quad (^\circ\text{C})$$

No índice TT, T e Td referem-se às temperaturas do bulbo seco e do ponto de orvalho, respectivamente, e os subscritos indicam os níveis de pressão (em hPa) correspondentes. Este índice é a soma dos índices de instabilidade: o *Vertical Totals* (VT), dado pelo taxa de variação vertical da temperatura entre os níveis médios de 850 e 500hPa, e o *Cross Totals* (CT), dado pela diferença do nível de umidade em 850hPa e a temperatura em 500hPa.

Uma limitação do índice TT é a sua dependência da umidade em 850 hPa, pois esta em baixos níveis pode estar mais abaixo dessa superfície. Mas, verifica-se sua eficiência quando existe uma camada seca em 700 hPa, pois, diferentemente do índice K, o TT exige calor e umidade em 850hPa e ar mais frio em 500hPa, não dependendo assim da umidade em 500 hPa; portanto o índice TT não é afetado por uma “secura” nos níveis médios. Se uma massa de ar é quente e úmida, os índices K e TT dão interpretações semelhantes, mas quando a massa de ar é mais fria e seca, o Total Totals tem melhores resultados por dar um peso maior à presença de ar frio em níveis médios (BENETI & SILVA DIAS, 1986; SILVA DIAS, 2000). Sendo útil para avaliar o entranhamento de ar frio na troposfera média (ESCOBAR *et al*, 2010).

De uma forma geral, os valores de TT a partir de 40°C indicam situações favoráveis a tempestades, e acima de 50°C indicam tempestades severas. (HENRY, 1987 *apud* NASCIMENTO, 2005).

2.1.3. Taxa de Variação Vertical da Temperatura Ambiental (Lapse-Rate – LR)

O índice LR representa a variação dT/dz para uma determinada camada atmosférica (níveis médios, entre 700 hPa e 500 hPa), de modo que quanto maior for a LR para uma dada camada, maior será a instabilidade atmosférica para convecção profunda.

$$LR = -\frac{dT}{dz} = \frac{((T_{500} - T_{700}) * 1000)}{(geo_{500} - geo_{700})}$$

Valores de LR menores que $6^{\circ}\text{C km}^{-1}$ indicam condição estável; entre $6^{\circ}\text{C km}^{-1}$ e $9.0-9.5^{\circ}\text{C km}^{-1}$ o ambiente é condicionalmente instável, tornando-se absolutamente instável (situações de instabilidade extrema) a partir de cerca de $9.5^{\circ}\text{C km}^{-1}$ (NASCIMENTO, 2004).

2.1.4. Índice CK

Para que exista a formação de convecção profunda, produtora de chuvas intensas e/ou extremas é necessário que haja uma combinação entre fatores dinâmicos e termodinâmicos na atmosfera, ou seja, uma combinação da instabilidade atmosférica e uma forçante para disparo da convecção em um determinado local.

Com este objetivo foi proposto o índice CK (LIMA, 2005). Este índice de instabilidade é a combinação de fatores dinâmicos e termodinâmicos de forma a caracterizar os ambientes favoráveis a formação de tempestades. No estudo de LIMA (2005) este índice caracterizou de forma mais precisa os locais de formação de tempestade, pois leva em conta a convergência nos baixos níveis o que determina com clareza regiões instáveis com possíveis movimentos ascendentes do ar, que promovem a formação de nuvens; ou regiões instáveis, mas com possíveis movimentos subsidentes do ar, que inibem a formação de nuvens.

O índice CK, é calculado a partir do produto entre o índice K e a divergência em baixos níveis em 850 hPa.

$$CK = K * \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

onde, no lado direito da equação, K é o índice K, e o termo entre parênteses representa o cisalhamento horizontal do vento, sendo u e v, as componentes zonal e meridional do vento, respectivamente.

Como foi visto, para a formação de tempestades severas, é necessário que se obtenha valores altos do índice K. E para que haja a formação das mesmas, é necessário também que haja convergência nos baixos níveis. Como a convergência é, na verdade, a divergência negativa e o índice K é um valor positivo, os valores correspondentes do índice CK favoráveis à formação de tempestades são os valores negativos resultantes da multiplicação. Em outras palavras, quanto mais negativo for os valores obtidos pelo índice CK mais favorável é a formação de nuvens convectivas numa determinada região.

LIMA (2005) ressalta que, por ser este um novo índice, se faz necessário testes e estudos em diversos outros casos de tempestades convectivas, principalmente naqueles casos onde os modelos numéricos não tenham sido capazes de prever chuva associada a tempestade. Sendo assim, tais estudos serão importantes para um melhor conhecimento do comportamento de índices deste tipo em situações de chuvas intensas e/ou extremas de caráter local e/ou regional, e também para tentar encontrar e estabelecer valores típicos e limiares para CK, que venham a representar uma situação favorável e/ou preferencial para o disparo e evolução de tempestades.

2.1.5. Índice CITT

Este índice, proposto por CERQUEIRA (2006), é baseado no método introduzido por LIMA (2005). O método de cálculo é o mesmo estabelecido para o índice CK, dado por:

$$\text{CITT} = \text{TT} * \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)$$

onde, no lado direito da equação, TT é o índice Total Totals, e o termo entre parênteses representa o cisalhamento horizontal do vento, sendo u e v, as componentes zonal e meridional do vento, respectivamente.

Da mesma forma que para o índice CK, regiões favoráveis à formação de tempestades são os valores negativos resultantes da multiplicação entre o índice TT e a convergência dos ventos em baixos níveis (850 hPa). Semelhantemente, quanto mais negativos forem os valores obtidos pelo índice CITT mais favorável será o disparo para a formação de tempestades numa determinada região.

O presente trabalho representa a evolução do trabalho de POLIFKE DA SILVA e JUSTI DA SILVA (2009) e POLIFKE DA SILVA e JUSTI DA SILVA (2010), onde serão apresentados de forma mais detalhada os parâmetros utilizados para a caracterização destes limiares sobre o Município do Rio de Janeiro como um auxílio na identificação e previsão destes sistemas convectivos causadores de grandes acumulados de precipitação.

3. METODOLOGIA

3.1. Determinação dos Casos de Chuvas Extremas

Os arquivos de precipitação do banco de dados da Fundação GEORIO (<http://www.rio.rj.gov.br/alertario>) foram consultados para aquisição de todos os dados disponíveis no período de 1997 a 2008. Os dados tomados a cada 15 minutos pelas 30 estações pluviométricas foram organizados para a obtenção de totais diários de precipitação, arquivo este que passou a servir como base para a primeira parte deste trabalho.

Para a determinação dos casos de precipitação de interesse, estabeleceu-se o limiar correspondente ao percentil de 99%, sendo este o número cujos valores de precipitação acima deste limiar eram considerados valores de precipitação extrema. O critério do percentil de 99% significa que os valores acumulados de precipitação de interesse são aqueles correspondentes a 1% dos maiores valores. Na tabela 3.1 estão listados os limiares correspondentes encontrados para cada uma das trinta estações. A análise desta tabela mostra como são diferenciados os regimes de precipitação sobre o município do Rio de Janeiro. Mesmo estando as estações de observação tão próximas, os eventos meteorológicos que provocam precipitação sobre a cidade são influenciados por condições topográficas, linha de costa e pela continentalidade, além de outros, que fazem com que valores de precipitação acima de 35,7mm na Penha possam ser considerado como sendo extremos, enquanto que são necessários mais do que 99,4 mm no Sumaré para a mesma classificação.

Para a determinação dos casos de chuva extrema sobre o município e para análise posterior foram feitas correspondências entre os valores encontrados de precipitação e as respectivas datas de ocorrência, levando-se em conta todas as estações pluviométricas. O critério estabelecido para neste trabalho levou as considerações feitas por DEREZYNSKI (2008) E BARCELLOS (2009). Sendo assim, foi estabelecido que um caso de precipitação extrema e, conseqüentemente, um caso a ser analisado, seria aquele que atingisse o limiar em no mínimo quatro estações sobre o município do Rio de Janeiro para a mesma data.

Tabela 3.1 – Limiares de totais diários de precipitação correspondentes ao percentil de 99% para cada uma das trinta estações da Fundação GEORIO no período de 1997-2008.

Estação	Limiar (mm)	Estação	Limiar (mm)
Anchieta	40,8	Madureira	38,2
Bangu	41,4	Mendanha	48,6
Cachambi	40,4	Penha	35,7
Campo Grande	37,6	Piedade	45,0
Cidade de Deus	43,8	Rio Centro	55,6
Copacabana	46,2	Santa Cruz	42,4
Gericinó	43,0	Santa Tereza	54,0
Grajaú	48,6	São Conrado	72,4
Grota Funda	56,9	Saúde	43,3
Guaratiba	39,9	Sepetiba	47,4
Ilha do Governador	46,4	Sumaré	99,4
Irajá	38,8	Tanque	41,8
Intanhangá	65,4	Tijuca	63,3
Itaúna	43,0	Urca	42,6
Jardim Botânico	59,0	Vidigal	55,8

Desta maneira foram determinados 84 casos de precipitação extrema no período de 1997 a 2008, que atenderam a este critério que podem ser verificados na Tabela 3.2

Tabela 3.2 - Casos selecionados de precipitação extrema no município do Rio de Janeiro, com o respectivo número de estações que ultrapassaram seus limiares de 99%.

Data Caso	No. Estações	Data Caso	No. Estações
05/01/1997	5	21/03/2003	9
09/01/1997	8	06/04/2003	9
15/03/1997	5	26/08/2003	13
08/01/1998	28	11/10/2003	22
16/01/1998	20	02/11/2003	9
11/02/1998	25	29/11/2003	12
14/03/1998	16	06/02/2004	10
22/03/1998	5	25/04/2004	14
04/05/1998	5	19/07/2004	5
20/07/1998	5	07/11/2004	9
01/10/1998	5	11/01/2005	10
07/10/1998	17	26/01/2005	16
15/12/1998	14	03/03/2005	19
24/12/1998	11	25/03/2005	9
08/01/1999	7	18/04/2005	6
15/01/1999	14	26/04/2005	12
09/02/1999	7	14/09/2005	4
18/02/1999	8	25/10/2005	15
12/03/1999	11	26/11/2005	20
07/06/1999	5	11/12/2005	20
09/12/1999	7	02/12/2005	7
02/01/2000	23	04/01/2006	9
16/02/2000	15	27/01/2006	20
19/03/2000	10	29/01/2006	11
03/09/2000	7	10/02/2006	11
26/11/2000	8	26/03/2006	8
01/12/2000	6	17/04/2006	14
31/01/2001	8	23/05/2006	12
28/03/2001	6	12/06/2006	5
18/06/2001	8	04/09/2006	4
20/10/2001	10	07/10/2006	7
16/12/2001	9	28/11/2006	7
24/12/2001	28	11/02/2007	25
02/02/2002	9	19/05/2007	9
22/05/2002	9	24/10/2007	28
23/06/2002	8	12/11/2007	10
24/09/2002	7	13/12/2007	19
05/11/2002	10	21/01/2008	13
02/12/2002	6	14/03/2008	15
09/12/2002	7	25/03/2008	5
24/01/2003	19	15/04/2008	8
17/03/2003	22	17/11/2008	7

Procurou-se determinar também o tipo de sistema meteorológico que deu origem a cada um destes episódios de chuva extrema. Foi feita uma busca de informações em artigos científicos já publicados e na página do CPTEC (www.cptec.inpe.br) nas partes referentes ao Boletim Climanálise e no Banco de Imagens de Satélites. Os resultados são mostrados na tabela 3.2.

Tabela 3.3 – Frequência dos sistemas meteorológicos causadores de chuvas extremas no município do Rio de Janeiro no período de 1997-2008.

	Número de ocorrências	(%)
Sistemas Frontais	66	78,57
ZCAS	13	15,48
Ciclogênese	1	1,19
Sem dados	4	4,76

Vale ressaltar que para os casos de chuvas extremas no município do Rio de Janeiro causadas por Sistemas Frontais podem estar associados a sistemas meteorológicos de escala menor forçados pela entrada de Frentes Frias, como, por exemplo, linhas de instabilidade pré-frontais ou nuvens Cumulonimbus isoladas. Isto pode ser verificado nos trabalhos de MOURÃO *et al* (2003), MENEZES *et al* (2000), GUIA *et al* (2006) e GROSSMAN (2010).

3.2. Análise da precipitação simulada pelo modelo WRF

Recentemente os pesquisadores do GePaC/UFRJ desenvolveram uma plataforma amigável para a realização de simulações atmosféricas usando o modelo WRF, denominada de PEAO, que foi usada e testada durante a realização deste trabalho de conclusão de curso. Especificamente para a consecução dos objetivos deste trabalho, o modelo WRF foi integrado com 10 km de resolução, gerando saídas horárias para todas as variáveis meteorológicas e de solo nos períodos de interesse. Quanto às parametrizações físicas, nas integrações do modelo foram utilizados os seguintes esquemas:

- Microfísica - Esquema de momento único de três classes - WSM 3 (HONG *et al*, 2004)
- Cúmulos - Esquema de “conjunto” de Grell-Devenyi (GRELL & DEVENYI, 2002)
- Radiação - Onda curta Dudhia (DUDHIA, 1989)/Onda longa – RRTM (MLAWER *et al*,1997)
- Camada Limite Planetária - Mellor-Yamada-Janjic (modelo Eta) (JANJIC, 2002)
- Camada Limite Superficial - Esquema do modelo ETA (JANJIC, 2002)
- Solo-Superfície - Modelo solo-superfície de Noah (CHEN & DUDHIA, 2001)

Uma descrição mais detalhada destas parametrizações se encontra no Apêndice I no final deste trabalho.

As simulações foram feitas num período de 72 horas, começando um dia antes do evento e terminando um dia depois, com o objetivo de caracterizar bem não só a o início, o fim e o total de precipitação, mas também os demais parâmetros atmosféricos relevantes.

A região de simulação está mostrada na Figura 3.1 e na figura 3.2 explicita-se o domínio da grade sobre o município do Rio de Janeiro onde foram comparados os valores simulados e observados durante os três eventos de chuva ocorridos. ($\Delta x = \Delta y = 10 \text{ km}$, $\Delta t = 60\text{s}$).

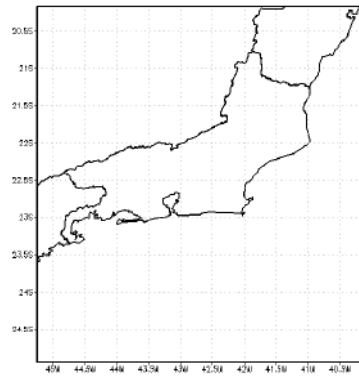


Figura 3.1 – Área sobre a qual foram simulados os casos de chuvas extremas no período de 1997-2008.

Foram escolhidos 5 bairros distribuídos por sobre o município para uma comparação da evolução temporal da precipitação: Anchieta, Copacabana, Itaúna, Santa Cruz e Tijuca e foram analisados os valores quantitativos da precipitação acumulada para os 84 casos de chuvas extremas apresentados anteriormente. Verificou-se que para quase na totalidade dos casos, a precipitação simulada pelo modelo foi subestimada quando comparada com a precipitação observada e em alguns poucos ela foi superestimada. Serão apresentados a evolução temporal de três casos de chuvas extremas, respectivamente, os casos 11 de fevereiro de 1998, 21 de março de 2003 e 19 de maio de 2007.

O caso 11 de fevereiro de 1998 foi escolhido para ser apresentado neste trabalho, pois o comportamento dos valores acumulados de precipitação simulada pelo modelo WRF foi similar à observada. O caso 21 de março de 2003 foi escolhido por ser o evento em que o modelo caracterizou a maior instabilidade atmosférica; e o caso 19 de maio de 2007 por ter sido um dos eventos que apresentaram baixa instabilidade atmosférica.

Os valores dos totais diários de precipitação observados em cada um dos cinco bairros e para cada um dos três casos estão apresentados na Tabela 3.4. Percebe-se que mesmo para eventos meteorológicos de grande extensão espacial, os valores observados não ultrapassam em todos os bairros escolhidos os limiares estabelecidos para chuvas extremas.

Tabela 3.4 - Valores de totais diários de precipitação observados para os cinco bairros representativos do município do Rio de Janeiro para os três casos de estudo.

	Limiar (99%)	11/02/1998	21/03/2003	19/05/2007
Anchieta	40,8	65,9	14,8	20,4
Copacabana	46,2	99,6	71,0	49,4
Itaúna	43,0	35,9	63,8	54,0
Santa Cruz	42,4	94,9	85,3	81,8
Tijuca	63,3	223,9	35,6	100,2

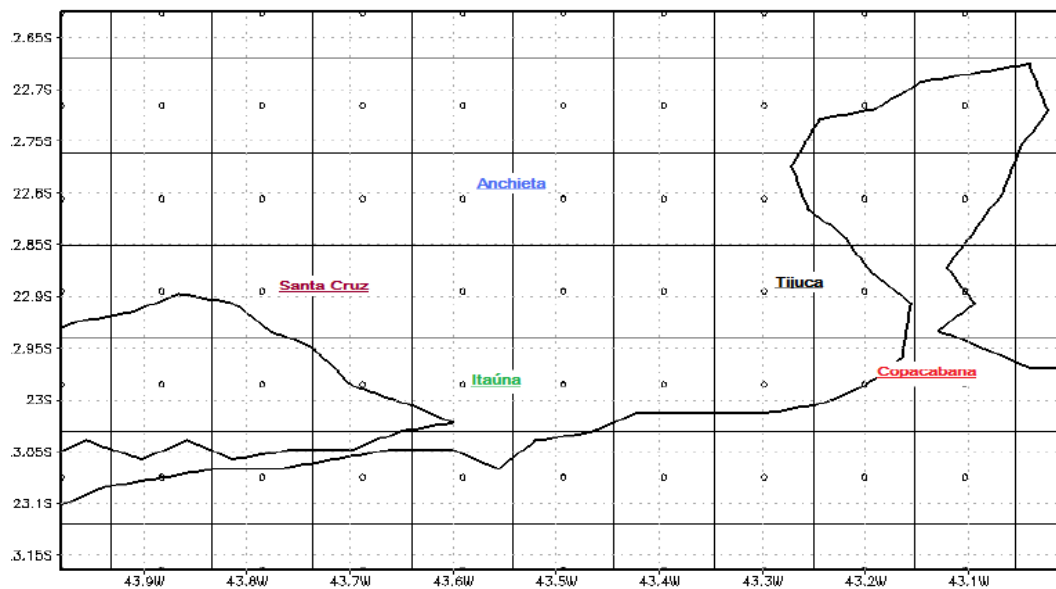


Figura 3.2 – Pontos de grade da simulação sobre o município do Rio e Janeiro usados para a comparação com as estações de observação de Anchieta, Santa Cruz, Itaúna, Tijuca e Copacabana.

4. RESULTADOS

4.1. Casos

4.1.1. Caso 11 de fevereiro de 1998

Segundo o Boletim de Climanálise do CPTEC, houve a passagem de um Sistema Frontal no dia 12/02/1998 sobre o Rio de Janeiro, dando origem a alguns Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs) no dia 11/02/1998, típico de uma situação pré-frontal. A partir deste dia, houve a configuração da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) até o dia 16/02/1998. Este caso teve um total diário de precipitação acumulado no dia do evento de 223,9 mm na estação Tijuca da Fundação GEORIO.

Nas imagens de satélite do dias 11 às 18Z (Figura 3.3 (a)) é possível observar nuvens convectivas sobre o Estado do Rio de Janeiro que causaram os grandes acumulados de precipitação. Na imagem dia 12 às 00Z (Figura 3.3 (b)), observa-se uma melhor configuração do Sistema Frontal que posteriormente se organizou e se tornou um evento de ZCAS.

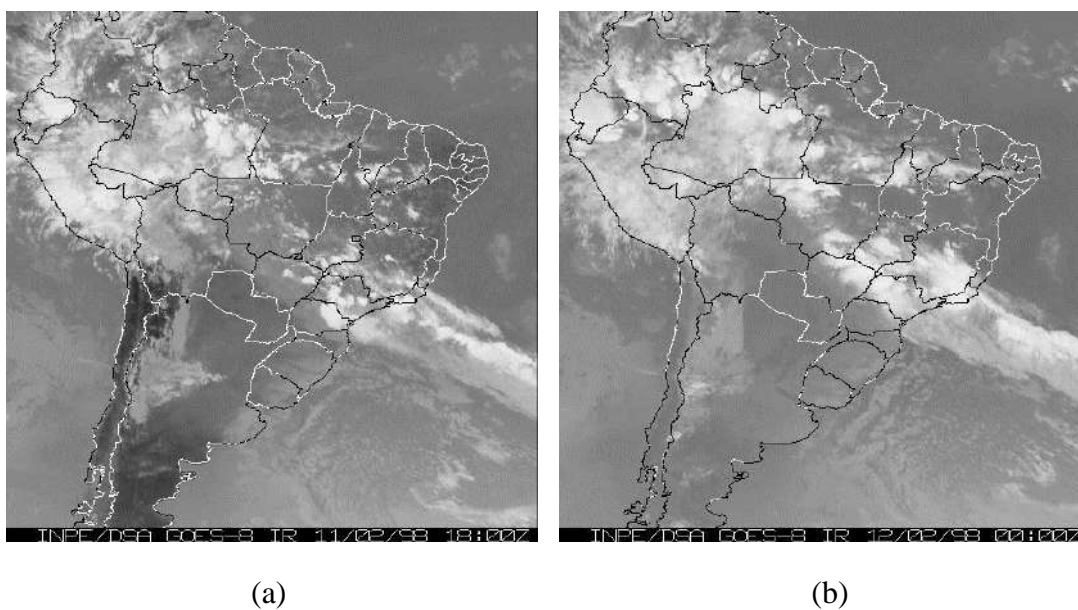


Figura 3.3 : Imagens do satélite GOES-08 no canal infravermelho para o dia (a) 11 de fevereiro de 1998 às 18Z. e (b) 12 de fevereiro de 1998 às 00Z.

A figura 3.4 apresenta a precipitação acumulada pelo modelo WRF para os dias 11 e 12 de fevereiro de 1998. A figura 3.5 mostra a evolução temporal da precipitação simulada pelo modelo WRF (SM) e a evolução temporal da precipitação observada (OB) para os cinco bairros mostrados na figura 3.2. Para este caso de chuva extrema ocorrido em 11/02/1998, verifica-se que o modelo conseguiu acompanhar de forma adequada o comportamento da precipitação ocorrida no evento. Para os bairros de Copacabana e Itaúna, observa-se que a precipitação acumulada simulada foi bem aproximada pelo modelo quando comparado com a observada. Para os bairros de Santa Cruz e Tijuca, verifica-se um comportamento da precipitação simulada menos similar em relação à observada e que nestes bairros a precipitação foi subestimada pelo modelo. Para o bairro de Anchieta, verifica-se que o modelo acompanhou bem o comportamento da precipitação, mas a superestimou.

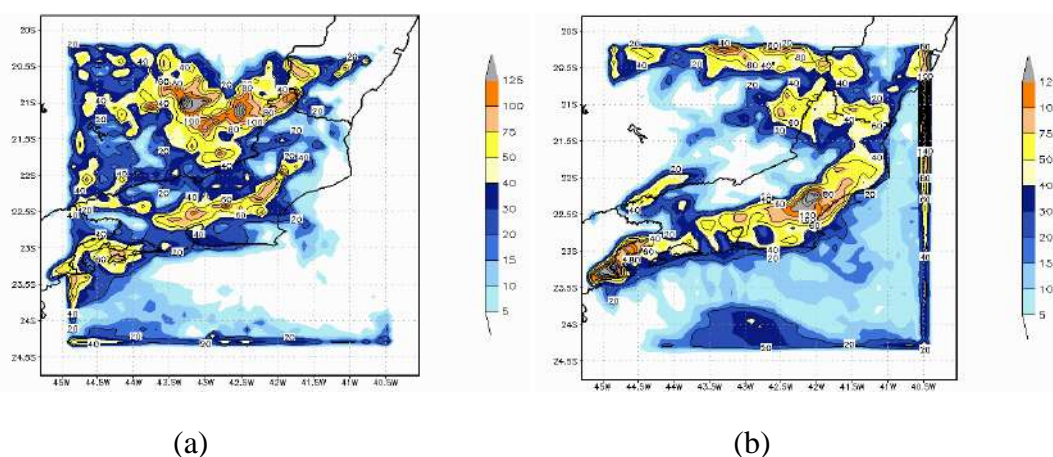
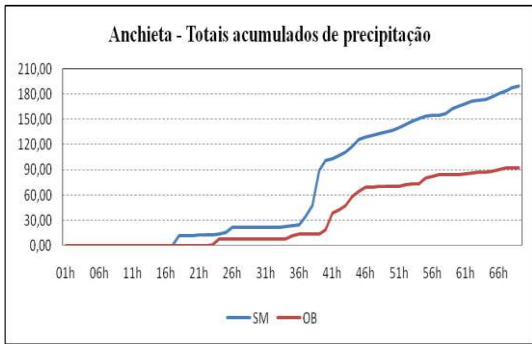
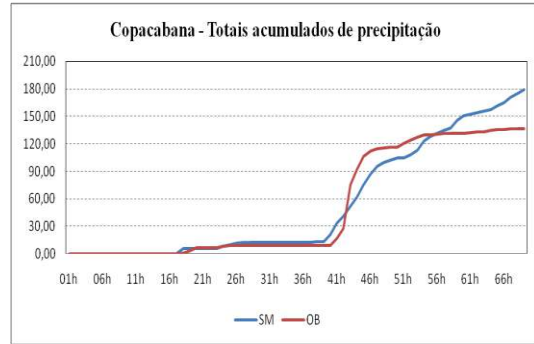


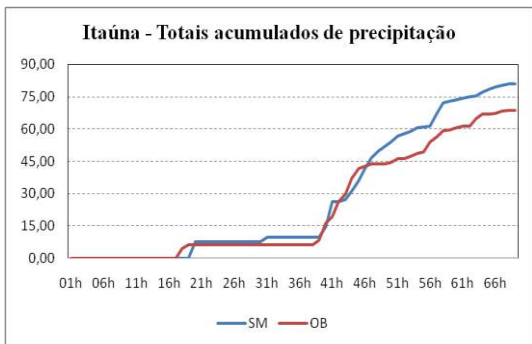
Figura 3.4: Precipitação acumulada simulada pelo modelo WRF para o dia (a) 11 de fevereiro e (b) 12 de fevereiro de 1998.



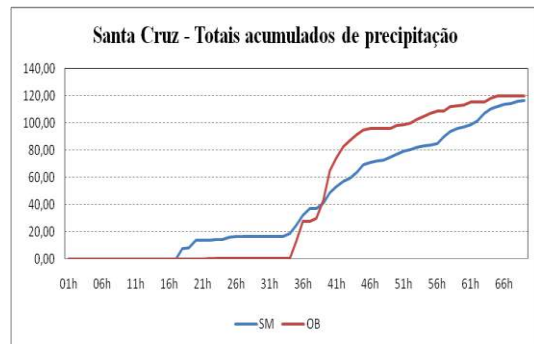
(a)



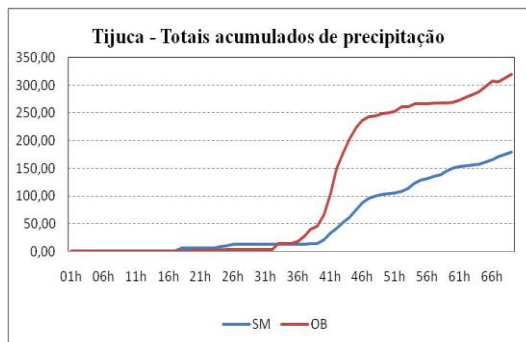
(b)



(c)



(d)

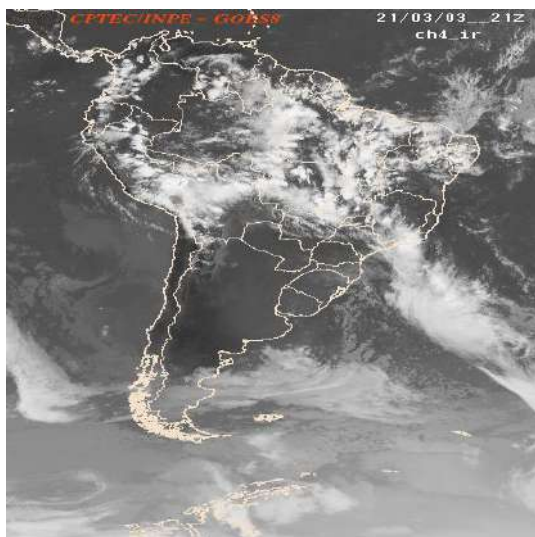


(e)

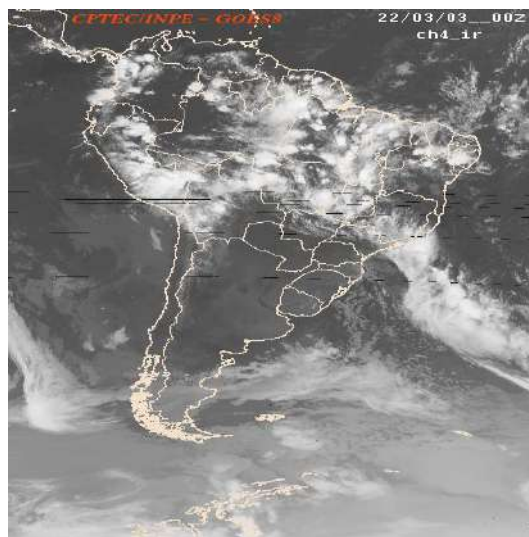
Figura 3.5 - Evolução da precipitação acumulada simulada (SM) e observada (OB) para o caso 11 de fevereiro de 1998 pelo modelo WRF para os bairros (a) Anchieta, (b) Copacabana, (c) Itaúna, (d) Santa Cruz e (e) Tijuca.

4.1.2. Caso 21 de março de 2003

Segundo o Boletim Climanálise do CPTEC na primeira quinzena do mês, as frentes frias deslocaram-se até o Rio de Janeiro devido à atuação de vórtices ciclônicos no norte de Minas Gerais. Mas, somente no dia 21, a quarta frente fria teve um deslocamento até Salvador-BA (Figura 3.6). A tempestade foi causada por diversas células convectivas bastante vigorosas e profundas que se encontravam embebidas na porção dianteira de um sistema frontal que penetrava no Estado do Rio naquele dia, como pode ser visto na figura 3.7 pelas imagens do satélite GOES-8 infravermelho, realçadas e setorizadas do dia 21 de março de 2003 nos horários das 19:45Z (a), 20:45Z (b), 22:15Z(c) e 23:45Z(d).

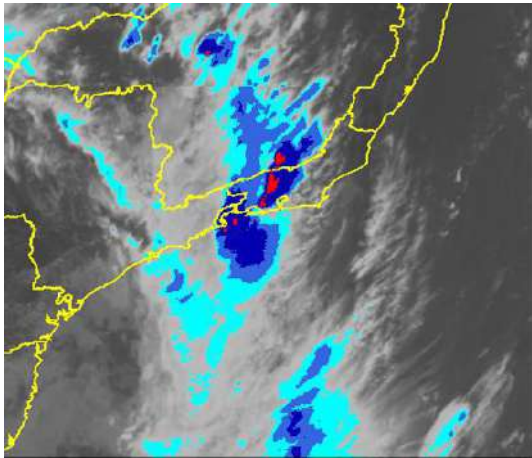


(a)

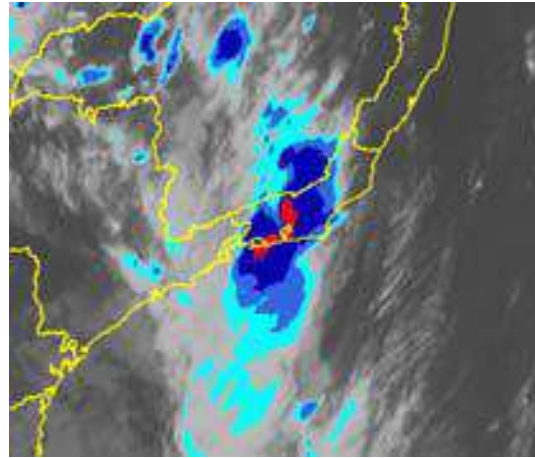


(b)

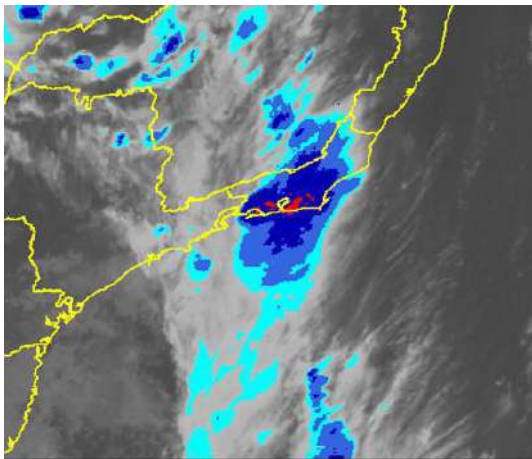
Figura 3.6 : Imagem de satélite MAS Retangular CH 4 no canal infravermelho para o dia (a) 21 de março de 2003 às 21Z e (b) 22 de março de 2003 às 00Z . (Fonte: CPTEC).



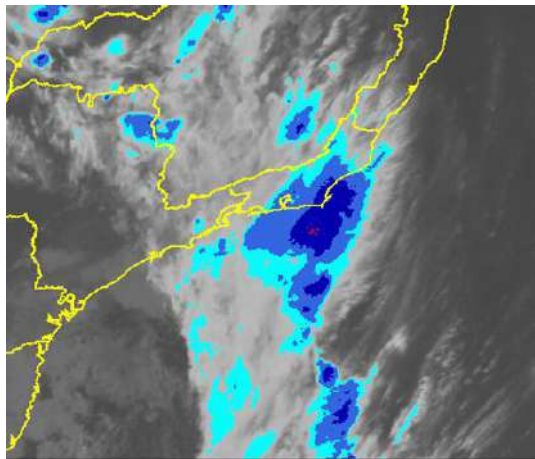
(a)



(b)



(b)



(d)

Figura 3.7: Imagens do Satélite GOES-8 canal infravermelho, realçadas e setorizadas do dia 21 de março de 2003 nos horários das 19:45Z (a), 20:45Z (b), 22:15Z(c) e 23:45Z(d). (Fonte: FURNAS)

A figura 3.8 apresenta a precipitação acumulada pelo modelo WRF para os dias 23 e 24 de março de 2003. Na Figura 3.9, observa-se a evolução temporal da precipitação simulada pelo modelo WRF (SM) e a evolução temporal da precipitação observada (OB) para os cinco bairros mostrados na figura 3.2. Para este caso de chuva extrema, verifica-se que o modelo conseguiu acompanhar de forma adequada o comportamento da precipitação ocorrida no evento, mas mostrou um atraso e também a subestimou quando comparada com a precipitação acumulada observada para os cinco bairros escolhidos (menos Anchieta).

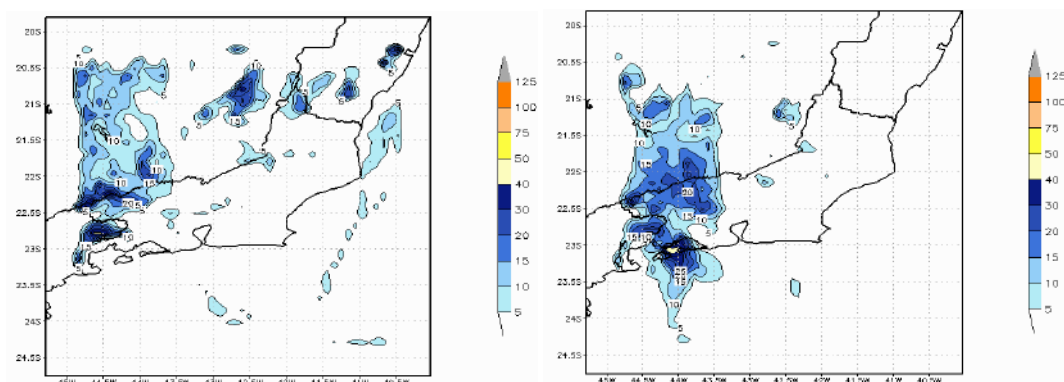
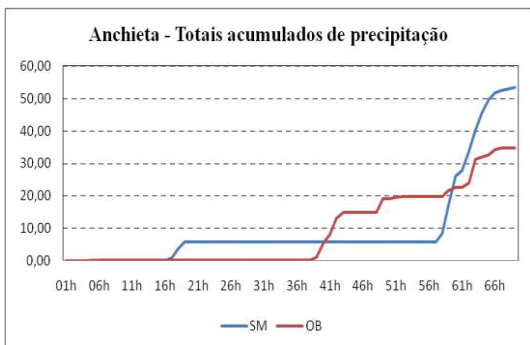
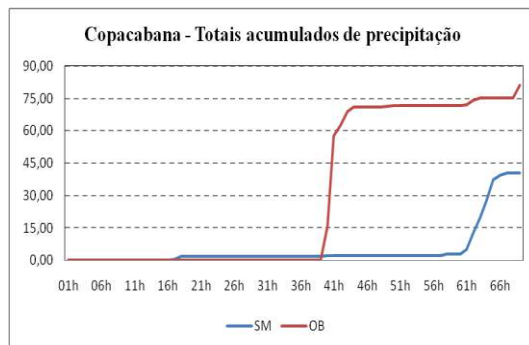


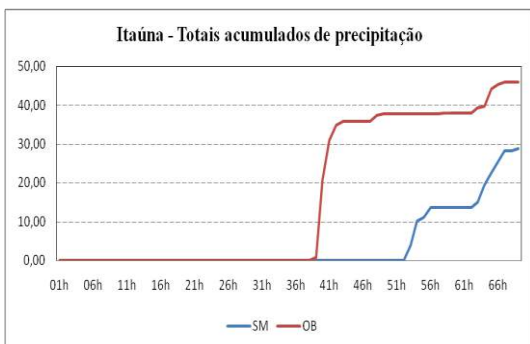
Figura 3.8: (a) Precipitação acumulada simulada pelo modelo WRF para o dia (a) 21 de março e (b) 23 de março de 2003.



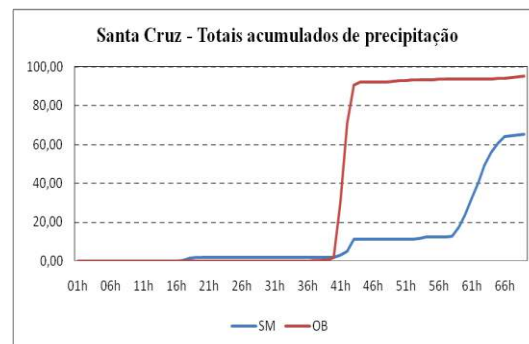
(a)



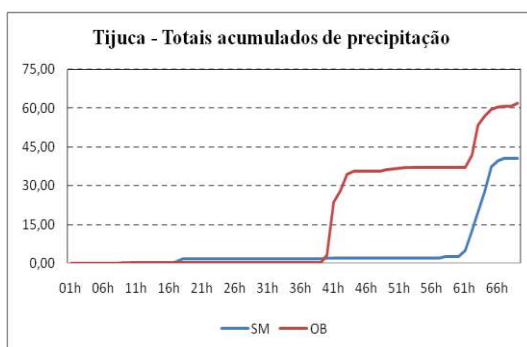
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.9 - Evolução da precipitação acumulada simulada (SM) pelo modelo WRF e observada (OB) para o dia 20, 21 e 22 de março de 2003 para os bairros (a) Anchieta, (b) Copacabana, (c) Itaúna, (d) Santa Cruz e (e) Tijuca.

4.1.3. Caso de 19 de maio de 2007

Segundo o Boletim Climanálise, um sistema frontal configurou-se no litoral da Argentina no dia 15 de maio chegando ao Brasil no dia seguinte. Este sistema frontal avançou pelo interior até Presidente Prudente em São Paulo e Campo Grande no Mato Grosso do Sul no dia 19 e, pelo litoral, deslocou-se até o Rio de Janeiro no dia 20. Esta frente fria também causou chuvas significativas em toda a região Sul do País e no Sudeste ocorreram chuvas significativas em algumas localidades de São Paulo e Rio de Janeiro.

Na figura 3.10 são mostradas as imagens de satélite, que caracterizam o sistema frontal já no final do dia 19 de maio, e na figura 3.11 os totais de chuva acumulada em 24 horas simulados pelo modelo WRF. Os campos de precipitação caracterizam bem a chuva decorrente da passagem do sistema inclusive com a chuva pós-frontal que delinea o litoral sob o efeito da circulação.

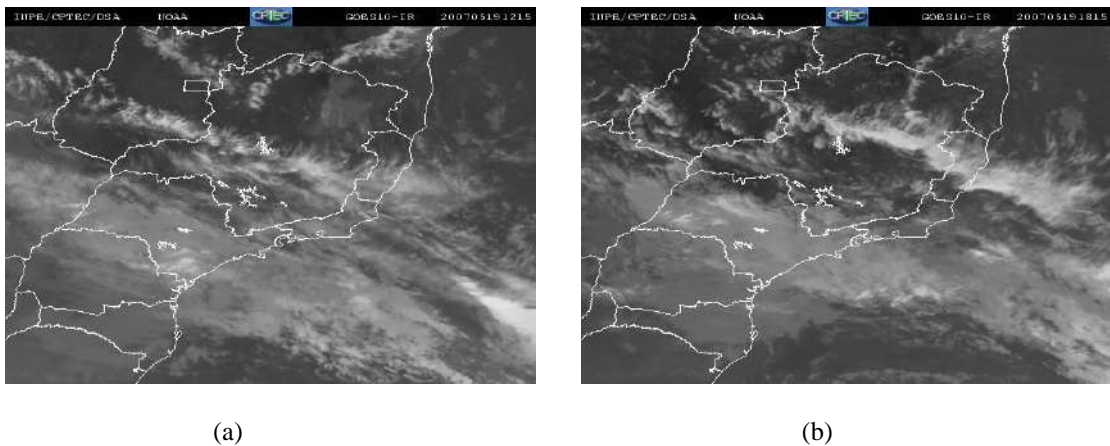


Figura 3.10: Imagens do Satélite GOES-8 canal infravermelho setorizadas do dia 19 de maio de 2007 nos horários das 12:15Z (a) e 18:15Z (b) (Fonte: CPTEC/INPE).

Na figura 3.12 observa-se a evolução temporal da precipitação simulada pelo modelo WRF (SM) e a evolução temporal da precipitação observada (OB) para os cinco bairros mostrados na figura 3.2. Para este caso de chuva extrema, verifica-se que o modelo não conseguiu acompanhar de forma adequada o comportamento da precipitação ocorrida no evento. Observa-se que a precipitação acumulada simulada foi subestimada pelo modelo quando comparado com a observada para os cinco bairros escolhidos. Ressalta-se que neste caso, o modelo adiantou a ocorrência da precipitação.

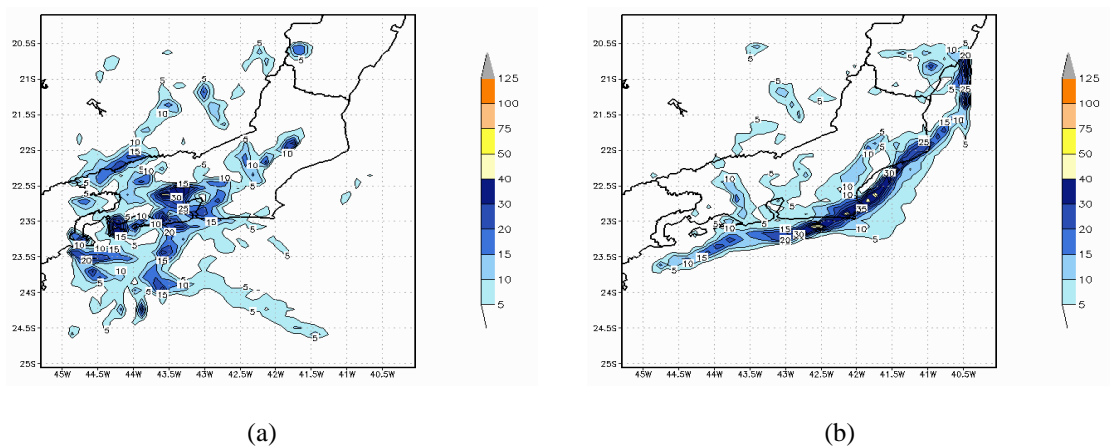
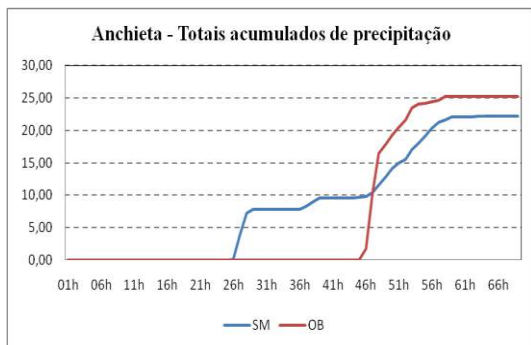
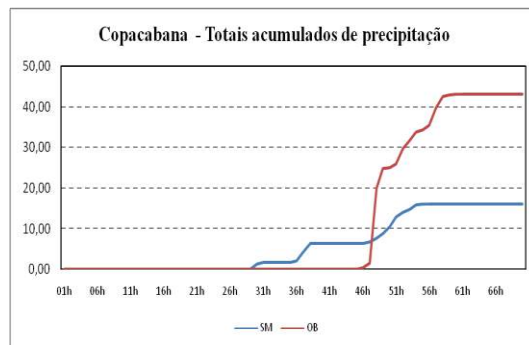


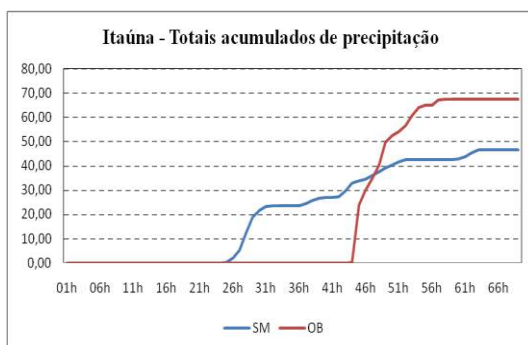
Figura 3.11 - Precipitação acumulada simulada pelo modelo WRF para o dia (a) 19 de maio e (b) 20 de maio de 2007.



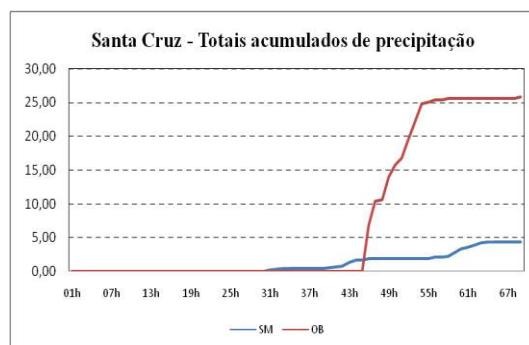
(a)



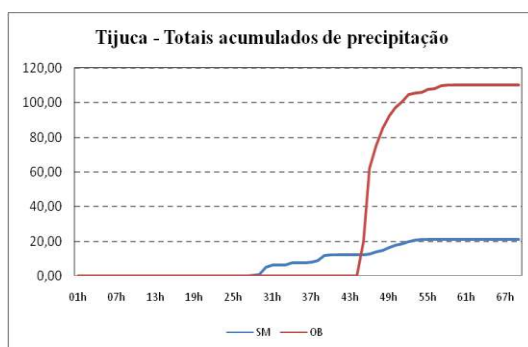
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.12: Evolução temporal da precipitação acumulada observada (OB) e simulada (SM) para os bairros no período de 18 a 20 de maio de 2007 em (a) Anchieta, (b) Copacabana, (c) Itaúna, (d) Santa Cruz (e) Tijuca.

Para os 84 casos de chuvas extremas simulados pelo modelo WRF neste trabalho, verificou-se que quase em sua totalidade a quantificação da precipitação foi subestimada pelo modelo. Verificou-se que em alguns poucos casos a precipitação simulada obteve valores e comportamento bem próximos a observada, mas mesmo assim foi subestimada na saída do modelo.

4.2 Resultados estatísticos

Como foi observado nos três estudos de caso apresentados neste trabalho, a quantificação da precipitação é quase que em todos os casos, subestimada também pelo modelo WRF. Sendo assim, como discutido anteriormente, espera-se que os indicadores de chuvas extremas se tornem ferramentas úteis para o auxílio à previsão da identificação de sistemas meteorológicos que possam causar estas altas taxas de precipitação acumulada horárias (chuvas intensas) ou diárias (chuvas extremas).

Em um primeiro estudo foram feitos cálculos e análises dos indicadores de chuvas extremas para cinco pontos mostrados na Figura 4.1. Foram escolhidos estes cinco pontos para que pudesse ser observado o comportamento dos índices no entorno e sobre o Município do Rio de Janeiro. Após isto, foram analisadas as evoluções temporais destes indicadores durante o mesmo período de integração utilizado na verificação da precipitação simulada.

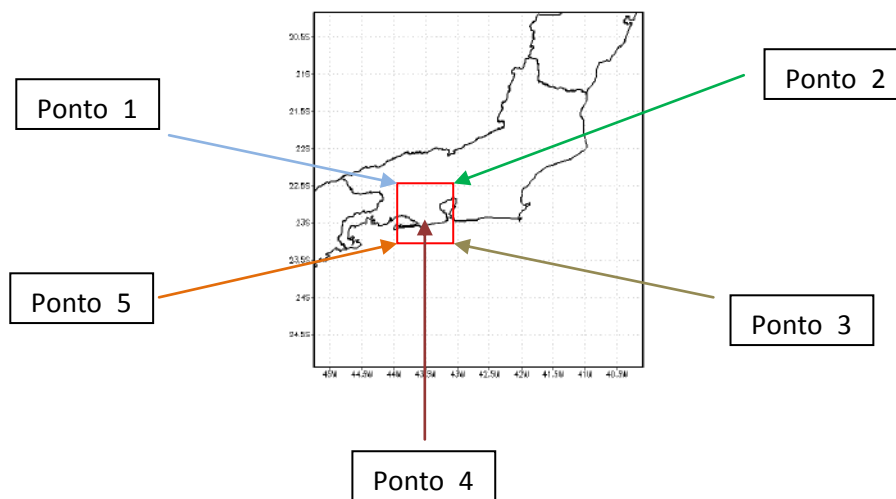


Figura 4.1 – Pontos onde foram calculados os indicadores atmosféricos de chuvas extremas.

4.2.1. Indicadores atmosféricos de chuvas extremas

4.2.1.1. Caso 11/02/1998

Na Figura 4.2, pode-se observar pela série temporal do índice K altos valores, acima de 30°C, praticamente durante todo o evento para todos os pontos estudados durante o dia da ocorrência do evento, caracterizando bem a instabilidade atmosférica presente nos três dias, que ofereceu a formação das nuvens convectivas verificadas nas imagens de satélite. Um pico deste índice é observado horas antes do dia em que houve o caso de chuva extrema (resultados similar encontrado por MOURÃO (2007)) indicando a presença de forte instabilidade dando suporte termodinâmico para a gênese dos sistemas convectivos típicos de uma situação pré-frontal. Posteriormente, observa-se uma queda deste índice, por volta das 35h, e um crescimento da instabilidade nos horários subseqüentes com um segundo máximo, por volta das 41h, onde foram registrados acumulados horários de precipitação neste instante (21h até 22h do dia 11/02/1998) de 39,7 mm na estação do Jardim Botânico, 40 mm na estação de Santa Tereza, 44,9 mm na estação do Sumaré, 44,1 mm na estação da Tijuca e 48 mm na estação do Gericinó.

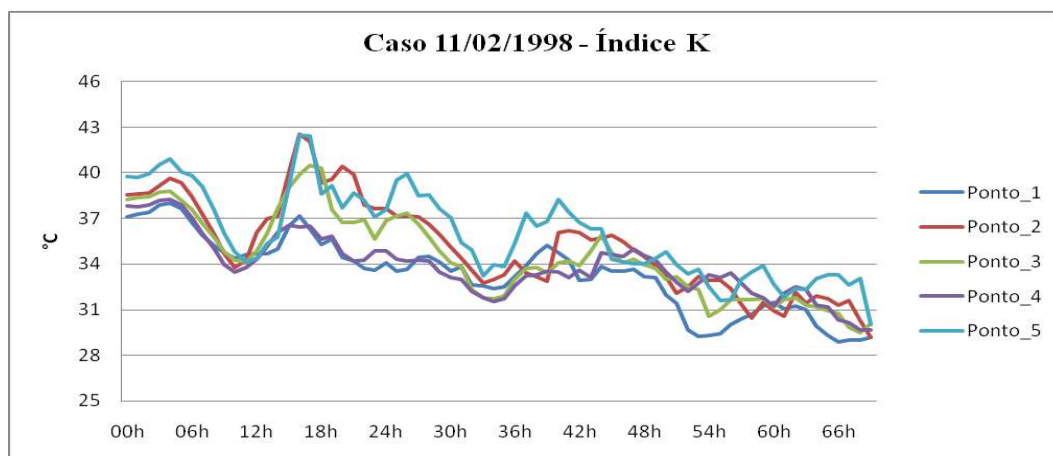


Figura 4.2: Evolução temporal do índice K no período simulado.

Na Figura 4.3, pode-se observar pela série temporal do índice TT altos valores, acima de 40°C durante os dias 10 e 11 para todos os pontos estudados durante o dia da ocorrência do evento. Diferentemente do índice K, a partir do fim do dia 11 (48h), no município do Rio de Janeiro, observa-se menores valores do índice TT, indicando que a partir deste dia a atmosfera encontrava-se mais úmida nos níveis médios, o que não ocorreu com o índice K. Um pico

deste índice, semelhante ao índice K, também é observado horas antes do dia em que houve o caso de chuva extrema indicando a presença de forte instabilidade dando suporte termodinâmico para a gênese dos sistemas convectivos típicos de uma situação pré-frontal.

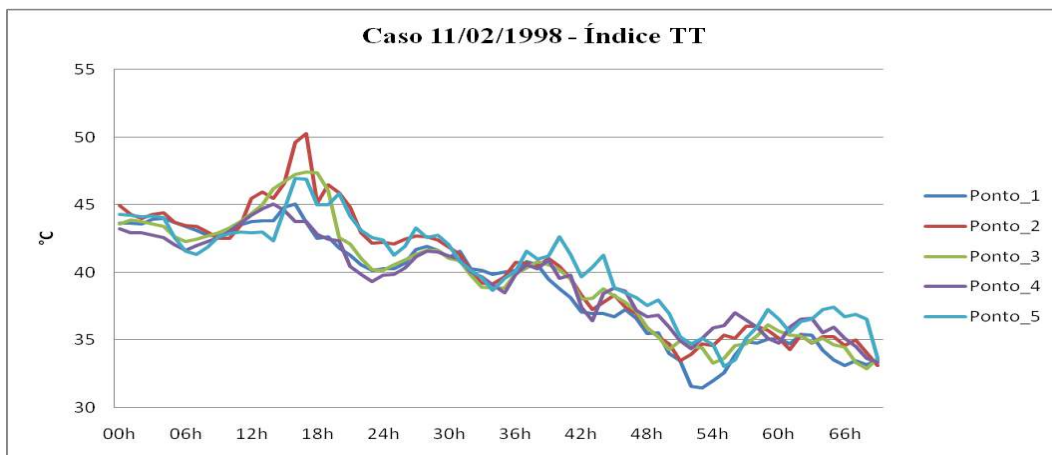


Figura 4.3: Evolução temporal do índice TT no período simulado.

Na Figura 4.4, pode-se observar pela evolução temporal do LR um aumento no horário onde ocorreram os máximos nos índices K e TT, chegando aproximadamente a 6,5°C/Km, para os cinco pontos estudados durante o dia da ocorrência do evento. Isto indica uma extensão da camada atmosférica entre 500-700 hPa, mostrando a região propícia a convecção para este horário.

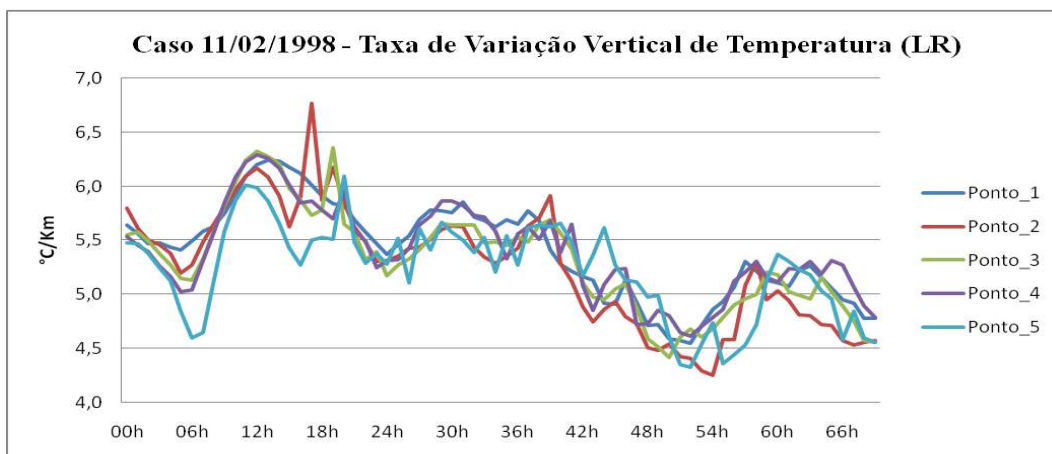


Figura 4.4: Evolução temporal do LR no período simulado.

Na Figura 4.5, pode-se observar pela evolução temporal da PNMM uma queda no horário onde ocorreram os máximos nos índices K e TT, chegando aproximadamente a 1008 hPa para todos os pontos estudados durante o dia da ocorrência do evento e com um mínimo de 1006hPa para o ponto 2. Valores baixos de PNMM indicam um movimento ascendente do ar, neste caso associado a uma forçante pré-frontal.

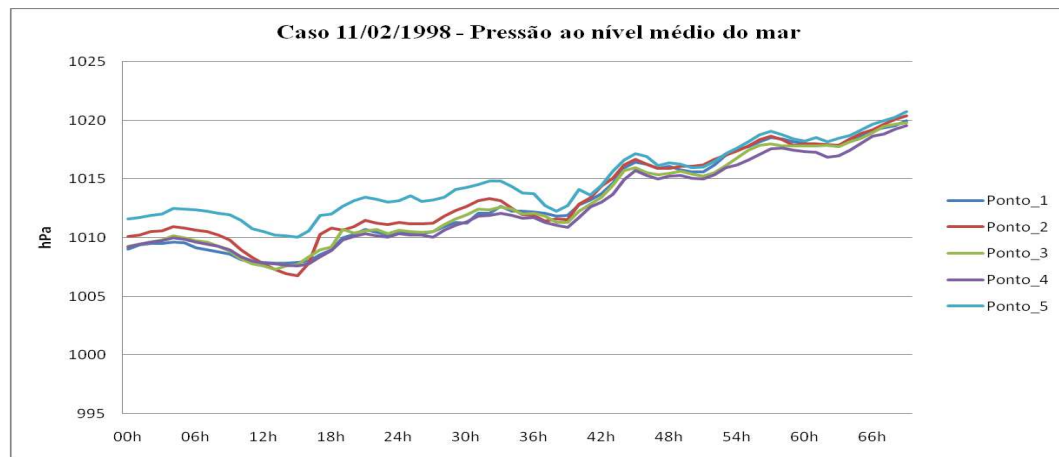


Figura 4.5: Evolução temporal da pressão ao Nível médio do mar no período simulado.

Na Figura 4.6, pode-se observar pela evolução temporal do movimento vertical (MV) um aumento no horário onde ocorreram os máximos nos índices K e TT, chegando a um máximo de aproximadamente a 0,8m/s para o ponto 2 estudado durante o dia da ocorrência do evento, indicando que a região a nordeste do Município do Rio de Janeiro estava mais favorável a formação de células convectivas no dia 10. Para o dia 11, são observados valores positivos (ascendentes) e negativos (descendentes) para todos os cinco pontos estudados, podendo caracterizar os movimentos ascendentes ou descendentes que ocorrem no interior de nuvens convectivas. O ponto 2 apresentou valores mais intensos indicando que neste caso a região a nordeste do Município do Rio de Janeiro estava mais instável com a presença de fortes movimentos ascendentes do ar.

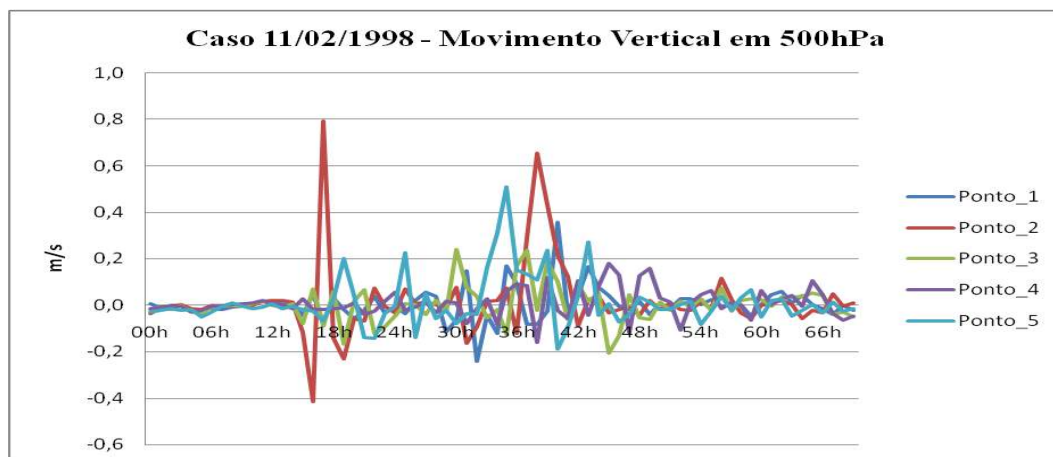


Figura 4.6: Evolução temporal do Movimento Vertical em 500 hPa no período simulado.

Pode-se observar pela evolução temporal da divergência do vento em 850 hPa (Figura 4.7) e a sua divergência em 250hPa (Figura 4.8), regiões favoráveis a formação das nuvens, são aquelas onde valores negativos de divergência (convergência) nos baixos níveis e valores positivos de divergência nos altos níveis. Verifica-se que para o horário onde ocorreu os máximos dos índices K e TT, observa-se mínimo (maior valor negativo) na convergência em baixos níveis, sendo o ponto 5 (centro do Município do Rio de Janeiro) o local mais favorável ao desenvolvimento de convecção. Já para a divergência nos altos níveis, pode-se observar valores positivos e negativos praticamente durante todo o evento para todos os pontos estudados caracterizando os locais e horários favoráveis e desfavoráveis à convecção, respectivamente. O comportamento destas duas variáveis foi semelhante ao Movimento Vertical em 500 hPa para o caso 11/02/1998.

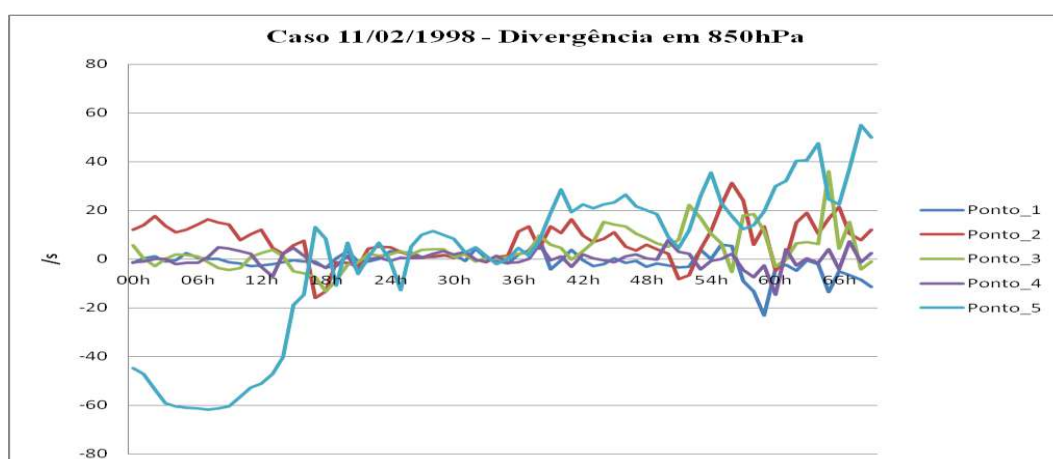


Figura 4.7: Evolução temporal da divergência do vento em 850 hPa no período simulado.

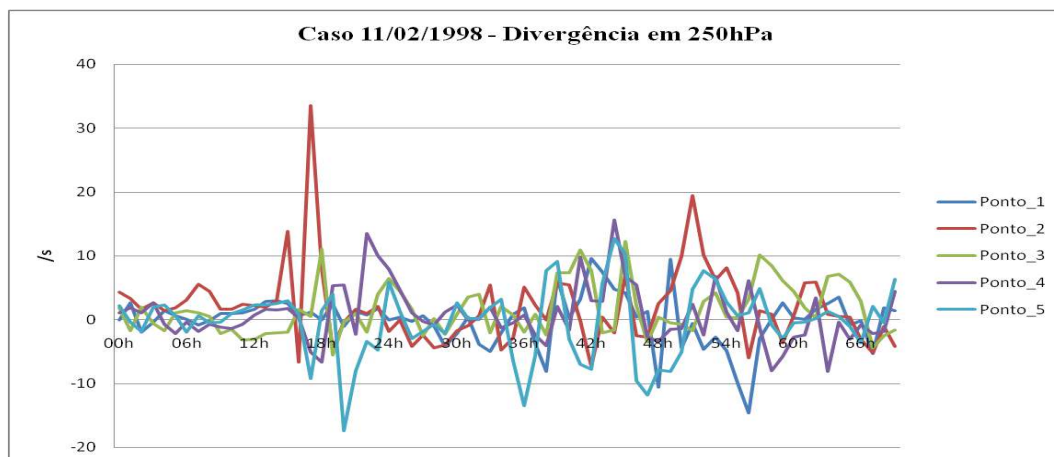


Figura 4.8: Evolução temporal da divergência do vento em 250 hPa no período simulado.

A evolução temporal dos índices CK e CITT tem um comportamento similar ao observado na Figura 4.7 devido à dependência destes índices com a convergência do vento nos baixos níveis. Por isso, a evolução temporal desses índices não será apresentada neste trabalho. Verificou-se também que a visualização destes índices em uma distribuição espacial representa melhor o ambiente atmosférico favorável/desfavorável para o desenvolvimento de sistemas convectivos do que a representação pontual dos mesmos.

4.2.1.2. Caso 21/03/2003

Na Figura 4.11, observa-se pela série temporal do índice K altos valores, acima de 30°C, praticamente durante todo o evento para todos os cinco pontos estudados caracterizando bem a instabilidade atmosférica favorável ao sistema convectivo que gerou os grandes acumulados de precipitação. São observados nas imagens de satélite (Figura 3.6) células convectivas no momento em que este índice teve maiores valores do que 40°C, por volta das 40h - 41h, onde foram registrados acumulados de precipitação às 20h do dia 21/03/2003 de 41,8 mm na estação de Copacabana, 59,2 mm na estação de Vidigal, 37,2 mm na estação de Itanhangá e às 21h acumulados de precipitação de 40,4 mm na estação de São Conrado.

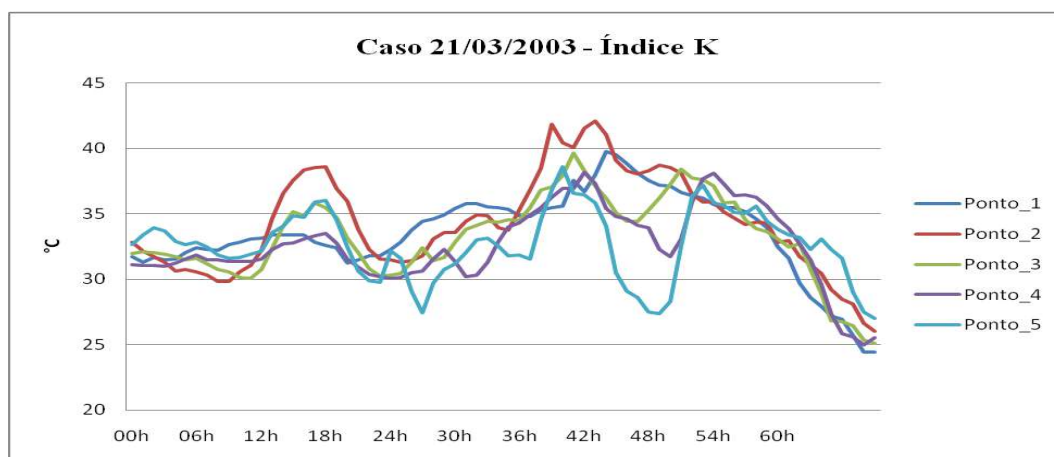


Figura 4.9: Evolução temporal do índice K no período simulado.

Na Figura 4.12, observa-se pela série temporal do índice TT altos valores, acima de 40°C durante o dia 23 para todos os cinco pontos estudados durante o dia da ocorrência do evento. Semelhante ao índice K, altos valores deste índice, chegando a ultrapassar os 50°C, no momento em que células convectivas se encontravam presentes sobre o Município do Rio de Janeiro no dia 21/03/2003.

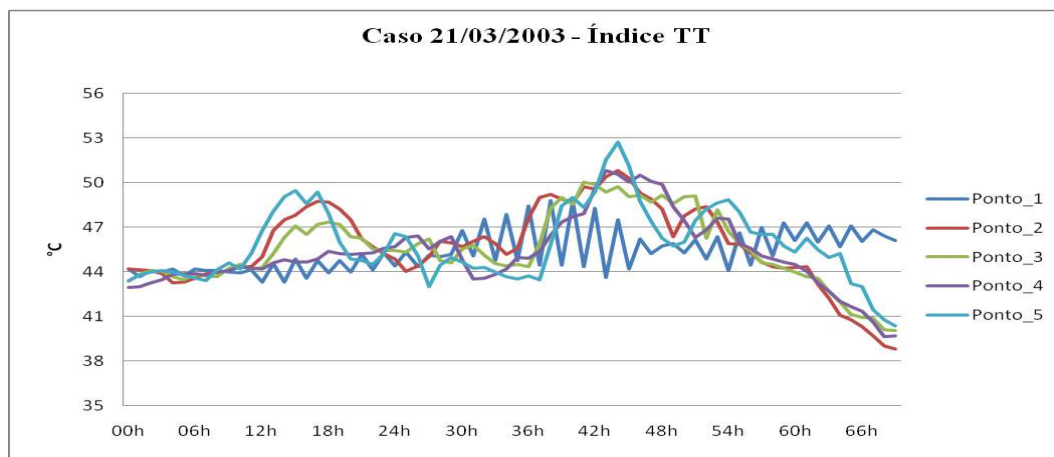


Figura 4.10: Evolução temporal do índice no período simulado.

Na Figura 4.13, observa-se pela evolução temporal do LR um aumento da variável no horário onde ocorreram os máximos nos índices K e TT, chegando aproximadamente a 7,0 °C/Km, nos pontos 4 e 5. Altos valores deste índice puderam ser verificados durante o dia da ocorrência do evento. Isto indicava uma extensão da camada atmosférica entre 500-700 hPa propícia a convecção ocorrida.

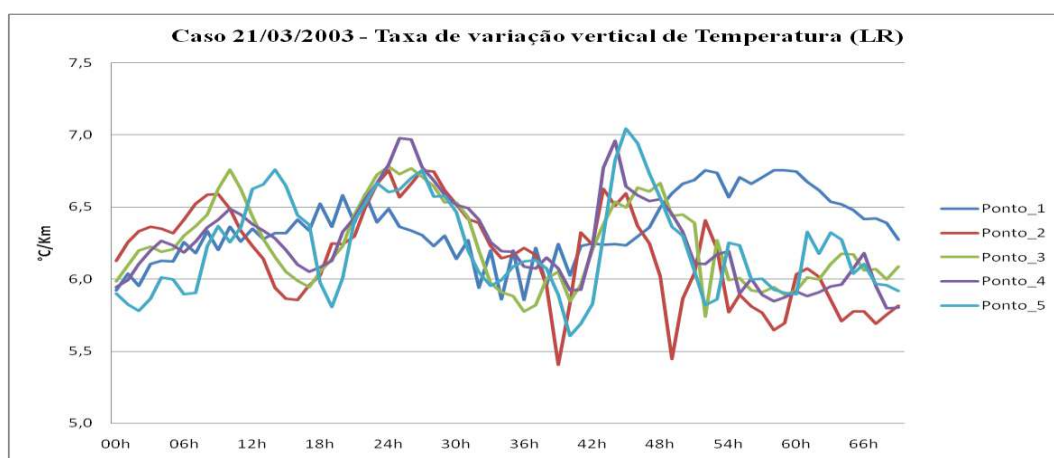


Figura 4.11: Evolução temporal do índice LR no período simulado.

Na Figura 4.14, observa-se pela evolução temporal da PNMM uma queda próxima aos horários em que ocorreram os máximos nos índices K e TT, chegando aproximadamente a 1009 hPa para todos os pontos estudados durante o dia da ocorrência do evento e logo depois observa-se um aumento desta variável.

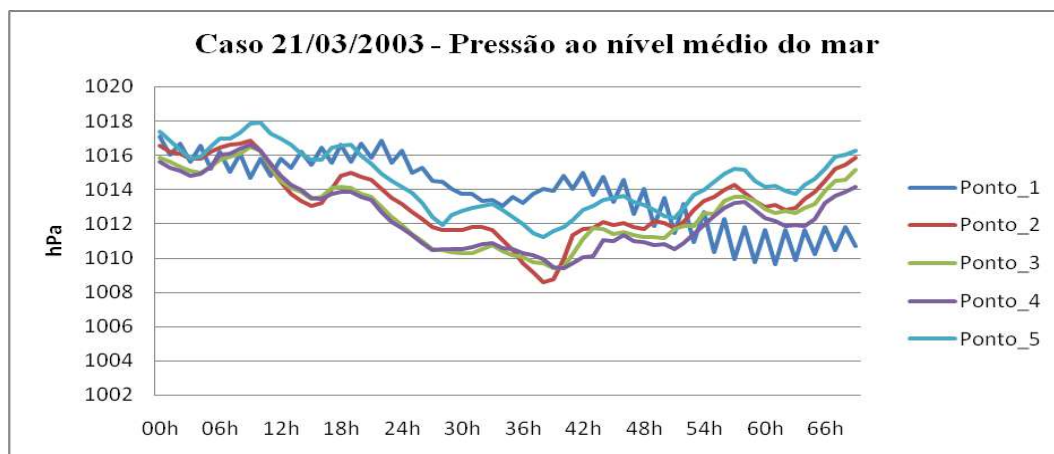


Figura 4.12: Evolução temporal da Pressão ao Nível médio do mar no período simulado.

Na Figura 4.15, observa-se pela evolução temporal do movimento vertical (MV) um aumento no horário onde ocorreram os máximos nos índices K e TT e queda da pressão ao NMM, chegando a um máximo de aproximadamente a 0,6m/s para o ponto 2 estudado durante o dia da ocorrência do evento, indicando que a região a nordeste do Município do Rio de Janeiro estava mais favorável a formação de células convectivas no dia 21. Um outro pico por volta das 52h com valor de 1,4 m/s no ponto 3, ou seja, que está à sudoeste do Município, é observado na evolução temporal indicando a presença de células convectivas após a ocorrência do evento, mas que não promoveram grandes acumulados de precipitação.

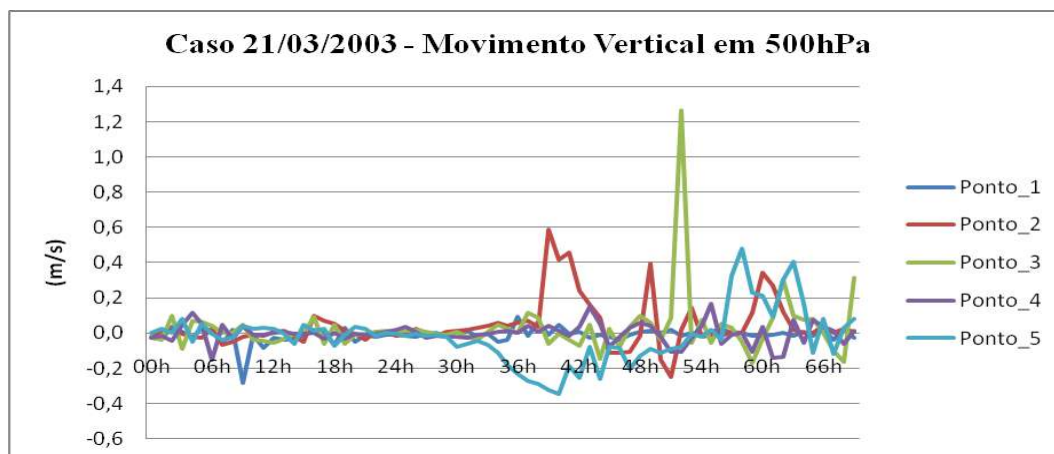


Figura 4.13: Evolução temporal do Movimento Vertical em 500hPa no período simulado.

Verifica-se que para os horários anteriores onde foi observado os máximos dos índices K e TT, mínimo (maior valor negativo) na convergência em baixos níveis (Figura 4.16), sendo os pontos 2 e 3 (nordeste e sudoeste do Município do Rio de Janeiro) os locais que deram maior forçante ao desenvolvimento de convecção no dia em que ocorreu este caso de chuva extrema. Já para a divergência nos altos níveis (Figura 4.17), observou-se valores positivos praticamente durante os horários em que as grandes células convectivas estavam presentes, caracterizando a grande extensão vertical do sistema.

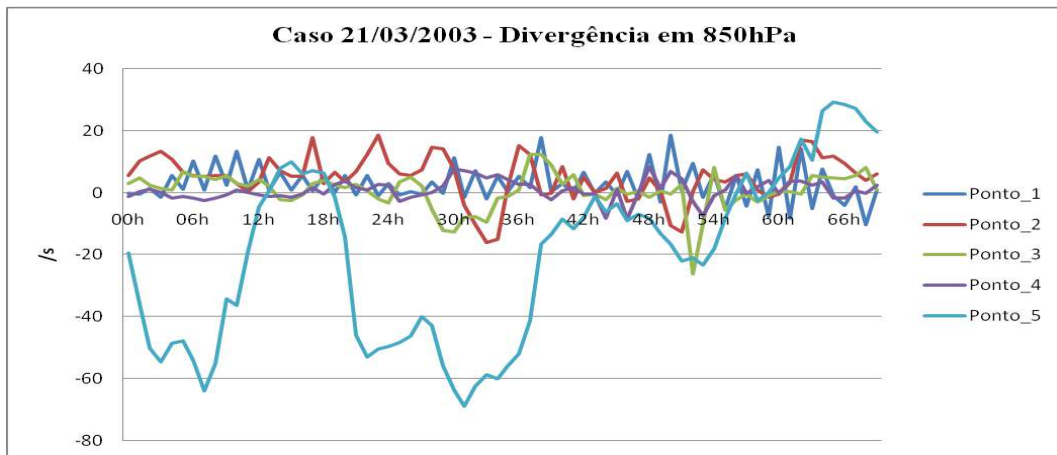


Figura 4.14: Evolução temporal da Divergência do vento em 850hPa no período simulado.

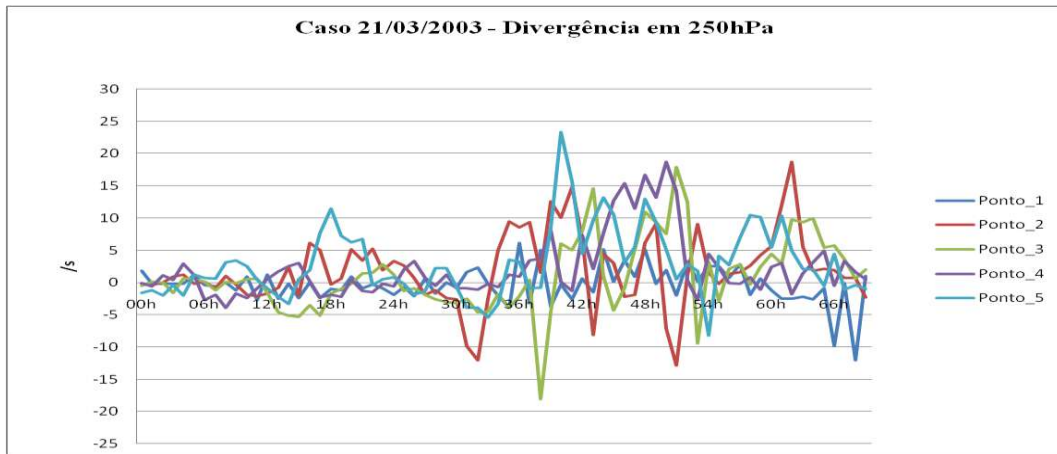


Figura 4.15: Evolução temporal da Divergência do vento em 250hPa no período simulado.

4.2.1.3. Caso 19/05/2007

Na Figura 4.20, observa-se pela série temporal do índice K que no dia anterior ao caso 19/05/2007 o valores deste índice eram muito baixos para quase todos os cinco pontos escolhidos, chegando a um mínimo de 4,8°C para o ponto 4, mas depois todos os cinco pontos começaram a mostrar a instabilidade atmosférica aumentando sobre o Município do Rio de Janeiro e no fim deste mesmo dia, os valores de K chegaram a 31°C no ponto 2. Diferentemente dos outros dois casos apresentados, os valores de K não foram tão altos, máximo de 35°C, mas permaneceram acima de 30°C durante todo o evento. Caracterizando que a atmosfera estava instável desde a noite do dia anterior e se manteve assim durante todo o dia, favorecendo a formação de nuvens que provocaram grande acumulado de precipitação para este dia.

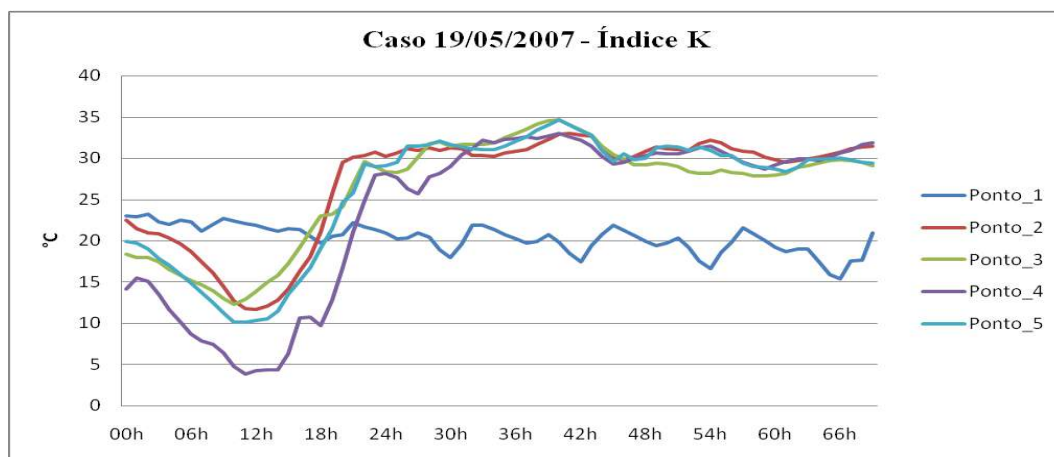


Figura 4.16: Evolução temporal do índice K no período simulado.

O comportamento do índice TT foi semelhante ao do índice K para o caso de chuva extrema 19/05/2007 (Figura 4.21). Ou seja, dia anterior ao caso o valores deste índice eram baixos para quase todos os cinco pontos escolhidos, chegando a um mínimo de 30°C para o ponto 5, mas depois todos os cinco pontos começaram a mostrar a instabilidade atmosférica aumentando sobre o Município do Rio de Janeiro e no fim deste mesmo dia, os valores de TT chegaram a 45°C no ponto 1. Diferentemente dos outros dois casos apresentados, os valores de TT não foram tão altos, máximo de 46°C, mas permaneceram acima de 40°C durante todo o evento. Caracterizando que a atmosfera estava instável e com disponibilidade de umidade nos baixos níveis desde a noite do dia anterior e se manteve assim durante todo o dia do evento favorecendo a formação de nuvens que provocaram grande acumulado de precipitação para este dia.

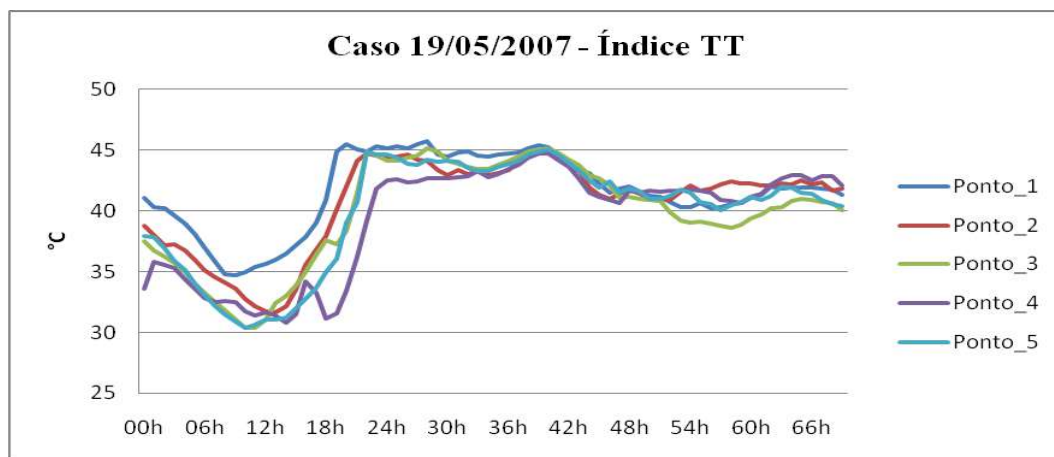


Figura 4.17: Evolução temporal do índice TT no período simulado.

Na Figura 4.22, observa-se pela evolução temporal do LR um aumento deste índice desde o dia anterior ao evento e mantendo valores, durante o dia do evento de chuva extrema, relativamente favoráveis a caracterização de uma atmosfera instável que favoreceu a formação de nebulosidade e precipitação. Diferentemente dos dois outros casos apresentados neste trabalho, os valores deste índice não foram tão altos, máximo de $6,2^{\circ}\text{C}/\text{Km}$, mas se mantiveram relativamente altos durante todo o dia em que o evento ocorreu.

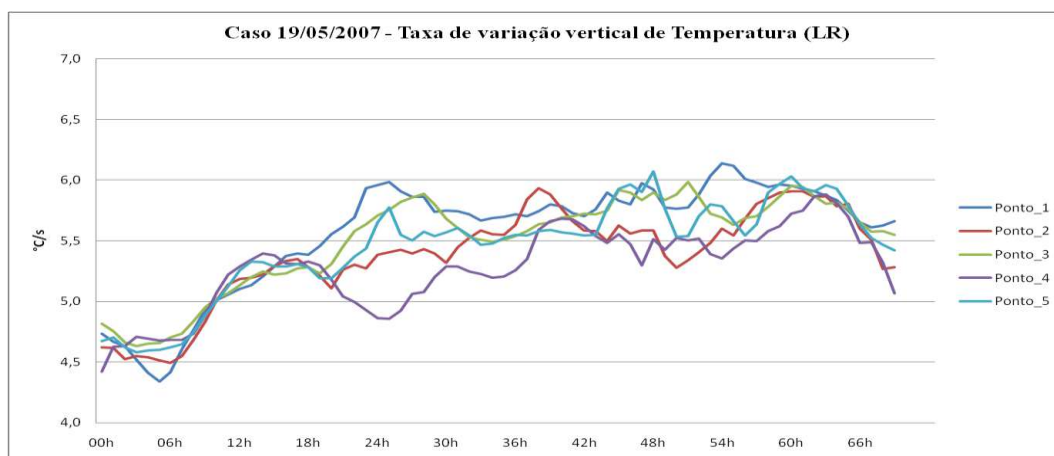


Figura 4.18: Evolução temporal do LR no período simulado.

Na Figura 4.23, observa-se pela evolução temporal da PNMM uma queda no horário onde ocorreram os mínimos nos índices K e TT, chegando aproximadamente a 1013 hPa para quase todos os pontos estudados antes do dia da ocorrência do evento. Valores baixos de PNMM indicam um movimento ascendente do ar, neste caso associado a uma forçante pré-frontal.

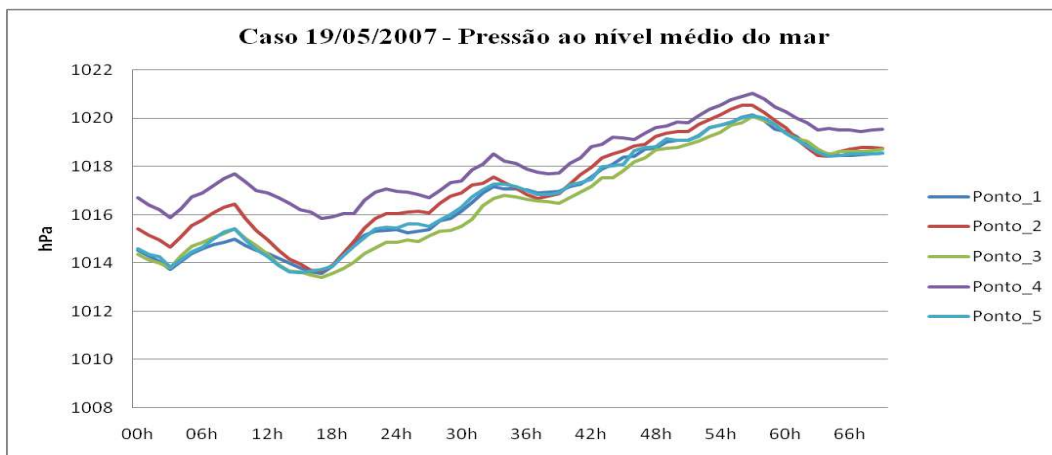


Figura 4.19: Evolução temporal da Pressão ao nível médio do mar no período simulado.

Na Figura 4.24 observa-se pela evolução temporal do movimento vertical (MV) picos desta variável próximo ao início do dia em que o evento ocorreu. Nos pontos 1 e 5 são observados altos valores deste indicador, por volta de 0,4m/s, indicando a presença de células convectivas sobre a região do Município do Rio de Janeiro.

Observa-se pela evolução temporal da convergência do vento em 850 hPa (Figura 4.25) e a sua divergência em 250hPa (Figura 4.26), que regiões favoráveis a formação das nuvens, são aquelas onde valores negativos de convergência nos baixos níveis e valores positivos de divergência nos altos níveis.

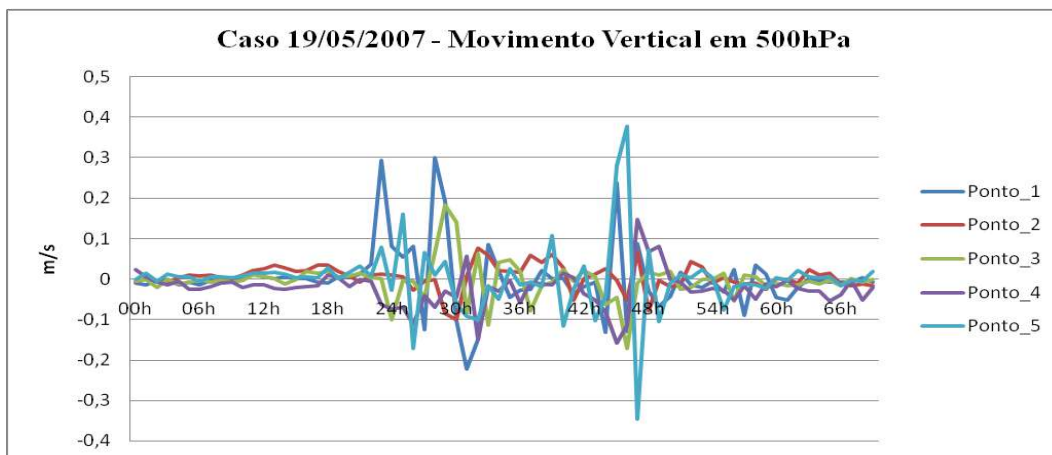


Figura 4.20: Evolução temporal do Movimento Vertical em 500hPa no período simulado.

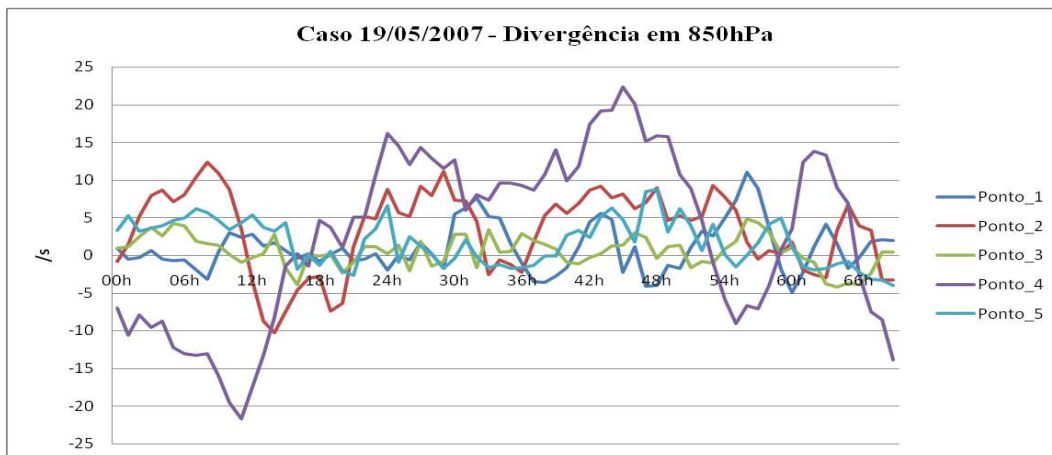


Figura 4.21: Evolução temporal da convergência do vento em 850hPa no período simulado.

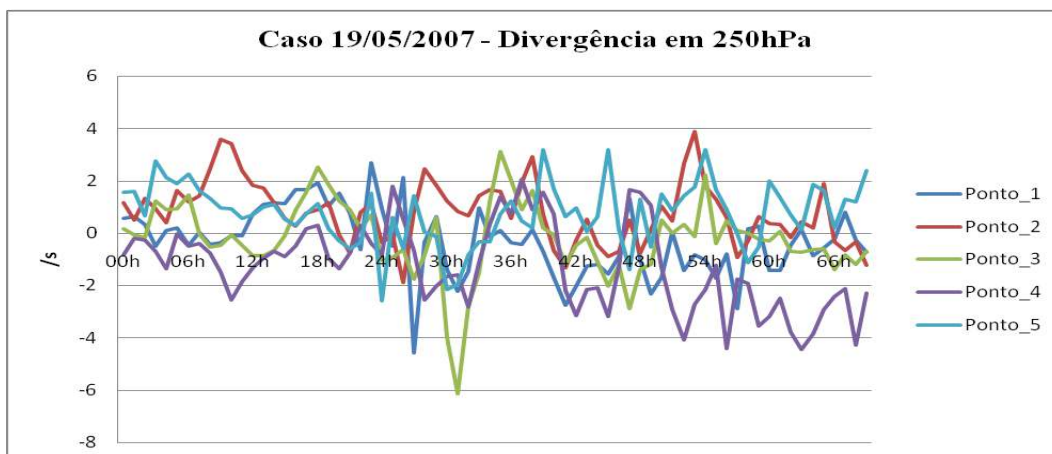


Figura 4.22: Evolução temporal da divergência do vento em 250hPa no período simulado.

4.2.2. Limiares para os indicadores de chuvas extremas

Após os estudos de caso dos indicadores de tempo severo para os cinco pontos da região de estudo delimitada na Figura 3.2, verificou-se a necessidade de um estudo detalhado de todos os pontos dentro da região com o objetivo do estabelecimento de limiares destes indicadores atmosféricos para o Município do Rio de Janeiro.

Trabalhos como GOTTLIEB e WISOCKY (2009) ressaltam que os valores padronizados dos índices de instabilidade foram calculados para uma região específica dos EUA. Segundo GOTTLIEB e WISOCKY, os valores iniciais pré-estabelecidos para estes índices foram calculados a partir de sondagens características de uma região de Planície localizada na porção sul do EUA nos dias em que houve a ocorrência de tempestades severas segundo a classificação estabelecidas por JOHN e DOSWELL (1992). Sendo assim, os valores obtidos representam de forma adequada o potencial de ocorrência de tempestades severas para aquela região não significando que para outras regiões os valores pré-estabelecidos destes índices possam também ser uma ferramenta na identificação da formação de tempestades severas. Concluindo-se assim, que é necessário um estudo detalhado destes índices para cada região de interesse, ou seja, uma regionalização destes índices de instabilidade nos dias de ocorrência de tempestades severas.

LIMA (2005) e GROSSMAN(2010) também ressaltam a necessidade de um estudo estatístico destes índices de instabilidade de forma que limiares dos mesmos fossem estabelecidos e que pudessem ser considerados como característicos da ocorrência de tempestades severas sobre o Município do Rio de Janeiro.

No trabalho de BARCELLOS (2009), cálculos de indicadores atmosféricos foram realizados somente para um ponto de grade correspondente do modelo numérico WRF. Os resultados mostraram que a análise de somente um ponto de grade diminui a probabilidade de acerto destes indicadores para eventos de chuvas intensas causadas por sistemas de mesoescala, pois podem não representar, devido à resolução espacial, os locais de disparo de convecção.

Diante disso, foram analisados todos os 120 pontos de grade dentro da região limitada na Figura 3.1 em todos os casos nos dias de ocorrência de chuvas extremas no período de 1997-2008. Parâmetros estatísticos foram calculados para obtenção dos indicadores atmosféricos e assim foi estabelecido limiares para cada um dos indicadores descritos na subseção 2.1. Os limiares dos indicadores atmosféricos de chuvas extremas são verificados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Limiares dos indicadores de chuvas extremas para o Município do Rio de Janeiro

	CITT	CK	CONV	DIV	K	TT	LR	P	MV
Máximo	2450,91	2007,17	61,87	91,70	42,83	52,75	8,38	1027,06	4,565
Mínimo	-3370,67	-2677,87	-79,68	-30,15	4,19	27,70	4,01	1004,41	-0,877
Mediana	26,65	18,28	0,64	0,05	31,75	42,93	5,86	1013,39	0,002
Média	34,90	24,63	0,92	0,34	30,60	42,14	5,85	1013,99	0,018
Desvio-padrão	304,38	226,97	7,22	3,96	5,72	3,74	0,40	4,32	0,111
Primeiro Quartil	-87,08	-61,36	-2,07	-1,66	27,96	39,72	5,62	1010,81	-0,023
Terceiro Quartil	154,38	110,49	3,71	1,84	34,72	44,69	6,10	1016,44	0,034

Verifica-se através da Tabela 4.1 que a probabilidade da ocorrência de chuvas extremas no Município do Rio de Janeiro é maior para os casos onde os indicadores atmosféricos de tempo severo estiverem abaixo do primeiro quartil (valores negativos, como, por exemplo, CK, CITT e CONV ou para os quais onde uma diminuição de seu valor indique ambiente favorável a convecção, como, por exemplo, a pressão) ou estiverem acima do terceiro quartil (valores positivos, como, por exemplo, o índice K, TT, LR, DIV e MV).

Sendo assim, baseado na amostragem de dados deste trabalho, locais que tenham, por exemplo, índice K acima de $34,7^{\circ}\text{C}$, TT acima de $44,7^{\circ}\text{C}$, CK abaixo de $-61,4^{\circ}\text{C}\cdot 10^{-6}/\text{s}$, CITT abaixo de $-87,1^{\circ}\text{C}\cdot 10^{-6}/\text{s}$, CONV abaixo de $-2,1\cdot 10^{-6}/\text{s}$, DIV acima de $1,842\cdot 10^{-6}/\text{s}$, LR acima de $6,1^{\circ}\text{C}/\text{Km}$, PNMM abaixo de 1010hPa e MV acima de $0,034\text{m}/\text{s}$ são os mais propícios a ocorrência de eventos extremos de precipitação (Tabela 4.1).

Ressalta-se que os índices de instabilidade K e TT são ferramentas que mostram o potencial atmosférico de num determinado local ocorrer à formação de tempestades e não a certeza da formação das mesmas. Por isso, principalmente, para os índices que dependem somente da termodinâmica da atmosfera existe grandes probabilidades de “alarmes falsos” ou “falsos positivos”, ou seja, regiões com altos valores de K e TT, mas que não promovem a formação de tempestades. Sendo assim, a combinação destes com forçantes de origem dinâmica, como, por exemplo, convergência nos baixos níveis, entrada de sistemas frontais que promovem a ascensão do ar e etc., ajudam na diminuição destes “alarmes falsos” e promovem uma maior certeza do local mais favorável ao desenvolvimento de tempestades severas. Sendo este o objetivo do desenvolvimento do índice CK, estabelecido por LIMA (2005) e o índice CITT, por CERQUEIRA (2006).

GROSSMAN (2010) também reforçou a metodologia dos índices combinados através da junção, por exemplo, dos índices K e TT, ou K e LR, que caracterizaram de forma melhor mais precisa os locais mais favoráveis a formação de tempestades, do que uma análise dos mesmos isoladamente.

Com o objetivo de verificar quais dos indicadores atmosféricos tiveram maior probabilidade de acerto dos casos de chuvas extremas simulados nesta monografia, compararam-se os respectivos quartis de cada um dos casos com os quartis da tabela 4.1 (todos os casos). Os resultados podem ser encontrados na tabela 4.2, onde o valor 0 indica que para o respectivo caso, o quartil do índice não esteve acima ou abaixo do quartil estabelecidos na tabela 4.1; e o valor 1 indica que o quartil esteve acima ou abaixo do quartil estabelecido na mesma tabela.

Tabela 4.2 – Comparação dos limiares dos quartis dos indicadores atmosféricos de chuvas extremas para o Município do Rio de Janeiro para cada caso ocorrido no período de 1997-2008.

	PNMMM	MV	LR	K	TT	CONV	DIV	CK	CITT	Somatório
CASOS	1011,010	0,036	6,103	34,320	44,545	-2,047	1,880	-59,905	-85,513	
05/01/1997	1	1	0	1	0	1	1	1	1	7
09/01/1997	0	0	1	1	1	1	0	1	1	6
15/03/1997	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
08/01/1998	1	1	1	1	0	1	0	1	1	7
16/01/1998	1	0	1	0	1	1	1	1	1	7
11/02/1998	1	1	0	1	0	0	1	0	0	4
14/03/1998	1	0	1	1	1	1	0	1	1	7
22/03/1998	0	0	1	1	1	1	0	1	1	6
04/05/1998	0	1	0	1	1	1	1	1	1	7
20/07/1998	0	1	1	1	1	1	0	1	1	7
01/10/1998	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
07/10/1998	0	0	1	1	1	1	0	1	1	6
15/12/1998	1	0	1	1	1	1	1	1	1	8
24/12/1998	0	1	1	0	1	0	1	0	0	4
08/01/1999	0	0	1	1	0	1	1	1	1	6
15/01/1999	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
09/02/1999	0	0	1	0	1	1	0	1	1	5
18/02/1999	0	0	1	0	0	1	0	0	1	3
12/03/1999	1	1	1	1	1	0	1	0	0	6
07/06/1999	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
09/12/1999	0	0	0	1	1	1	1	1	1	6
02/01/2000	1	0	0	1	1	0	0	1	1	5
16/02/2000	0	1	1	0	0	0	1	0	0	3
19/03/2000	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2
03/09/2000	0	1	0	0	0	1	1	1	1	5
26/11/2000	0	0	1	0	1	0	1	0	1	4
01/12/2000	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2
31/01/2001	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
28/03/2001	0	0	1	0	1	1	0	1	1	5
18/06/2001	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2
20/10/2001	1	1	0	1	1	1	1	1	1	8
16/12/2001	1	1	0	1	1	1	1	1	1	8
24/12/2001	1	1	1	1	1	1	0	1	1	8
02/02/2002	0	0	1	1	1	1	1	1	1	7
22/05/2002	0	1	0	0	0	1	0	0	0	2
23/06/2002	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24/09/2002	0	0	1	0	0	1	1	1	1	5
05/11/2002	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2
02/12/2002	0	0	1	1	1	1	0	1	1	6
09/12/2002	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
24/01/2003	0	0	1	0	0	1	0	1	1	4
17/03/2003	0	1	1	0	1	0	1	0	0	4

Tabela 4.2 – Continuação.

	PNMMM	MV	LR	K	TT	CONV	DIV	CK	CITT	Somatório
CASOS	1011,010	0,036	6,103	34,320	44,545	-2,047	1,880	-59,905	-85,513	
21/3/2003	1	0	1	1	1	1	1	1	1	8
6/4/2003	0	0	1	0	0	1	0	1	1	4
26/8/2003	0	1	1	0	0	0	0	0	0	2
11/10/2003	0	0	1	0	0	1	1	1	1	5
2/11/2003	1	0	0	0	0	1	0	1	1	4
29/11/2003	1	0	0	1	0	0	0	0	0	2
6/2/2004	1	0	0	0	0	1	0	1	1	4
25/4/2004	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
19/7/2004	0	0	1	0	0	1	0	1	1	4
7/11/2004	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
11/1/2005	1	0	1	1	1	1	0	1	1	7
26/1/2005	1	1	0	1	1	1	1	1	1	8
3/3/2005	0	1	0	0	0	1	1	1	1	5
25/3/2005	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
18/4/2005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26/4/2005	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
14/9/2005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25/10/2005	0	0	1	1	1	1	0	1	1	6
26/11/2005	0	1	0	0	0	1	0	0	0	2
2/12/2005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11/12/2005	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
4/1/2006	1	1	1	1	1	1	1	1	1	9
27/1/2006	1	0	1	0	1	0	1	0	0	4
29/1/2006	1	0	1	1	1	1	1	1	1	8
10/2/2006	1	0	0	1	1	1	0	1	1	6
26/3/2006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17/4/2006	0	1	0	0	0	0	1	0	0	2
23/5/2006	0	1	0	0	0	0	1	0	0	2
12/6/2006	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
4/9/2006	0	1	1	0	1	0	1	1	1	6
7/10/2006	0	1	0	1	1	1	1	1	1	7
28/11/2006	1	0	0	1	1	1	0	1	1	6
11/2/2007	1	0	0	1	1	1	1	1	1	7
19/5/2007	1	1	0	1	1	0	0	0	0	4
24/10/2007	0	1	0	0	0	0	1	0	0	2
12/11/2007	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
13/12/2007	0	1	0	0	0	0	1	0	0	2
21/1/2008	0	1	0	1	0	0	0	0	0	2
14/3/2008	1	1	0	1	0	0	0	0	0	3
25/3/2008	0	1	1	0	0	0	1	0	0	3
15/4/2008	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
17/11/2008	0	0	1	0	1	0	0	0	0	2
	33	39	38	35	38	43	35	43	44	

Verifica-se através da tabela 4.2, que os índices com valores mais frequentes na identificação de chuvas extremas para o Município do Rio de Janeiro são os índices CK e CITT.

4.3. Campos dos indicadores atmosféricos simulados pelo modelo WRF

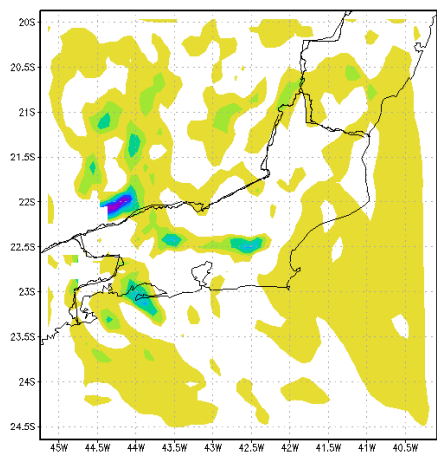
Este trabalho também teve como motivação o estudo da quantificação da precipitação e dos indicadores atmosféricos de chuvas extremas simulados pelo modelo WRF para serem utilizados na forma operacional disponível na página do Laboratório de Prognósticos em Mesoescala da UFRJ (www.lpm.meteoro.ufrj.br).

Por isto, nessa seção serão apresentados campos dos indicadores atmosféricos, unicamente o caso de chuva extrema ocorrido no Município do Rio de Janeiro no 21/03/2003 (pois dos 84 casos estudado neste trabalho, foi o que apresentou maior instabilidade atmosférica), gerados através da ferramenta GrADS que geralmente são consultados e utilizados por meteorologistas operacionais que trabalhem na área de previsão do tempo. Os campos de cada indicador serão mostrados em uma primeira parte sem o estabelecimento de limiares e em seguida, os mesmos campos serão mostrados com os limiares encontrados na Tabela 4.1. Para o caso 21/03/2003 os campos da Divergência em 250hPa, Movimento vertical em 500hPa e Pressão ao nível médio do mar não mostraram diferenças sem e com o estabelecimento de limiares. Por isso, os campos destas três variáveis serão mostrados somente uma vez.

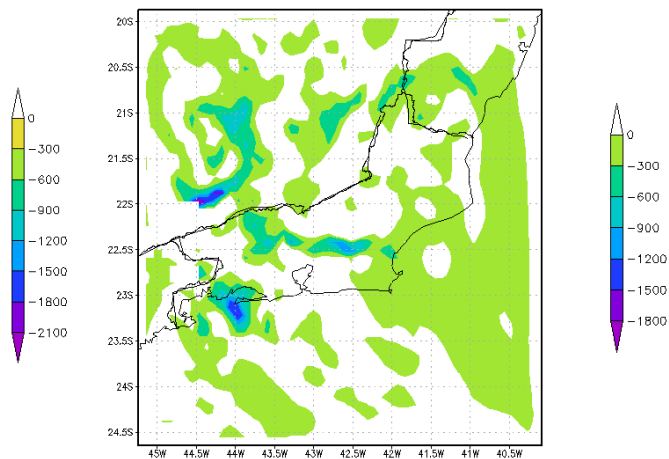
4.3.1. Análise dos resultados dos indicadores atmosféricos

4.3.1.1. Índice CK

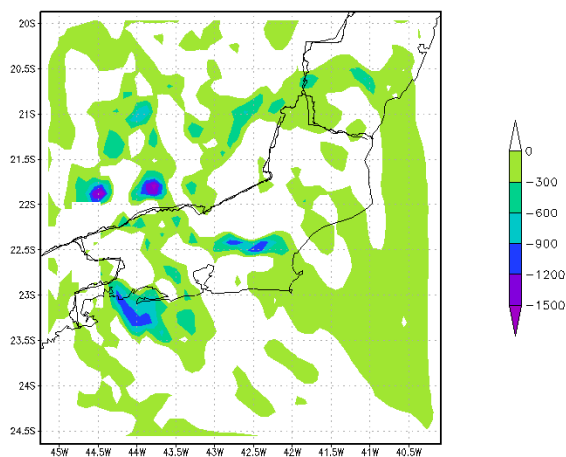
Nos campos do índice CK simulados pelo modelo WRF, observou-se valores do CK bem negativos a sudoeste do Município do Rio de Janeiro, em torno de $-1000 \cdot 10^{-6} \text{C/s}$ em quase todos os quatro horários (20:00Z, 21:00Z, 22:00Z e 23:00Z) mostrados caracterizando bem a alimentação do sistema pelos baixos níveis da atmosfera e mostrando as condições favoráveis à formação de nuvens convectivas. Ressalta-se que os valores de CK observados pela modelagem para este caso de chuva extrema estavam abaixo do limiar estabelecido para este indicador (abaixo de $-44,7^\circ\text{C}$) caracterizando bem um sistema que teria potencial para provocar grandes acumulados de precipitação sobre o Município do Rio de Janeiro. Vale ressaltar que nos locais onde se observa maiores valores de CK foram justamente os locais que surgiram nuvens de maior extensão vertical verificadas nas imagens de satélite (Figura 3.6).



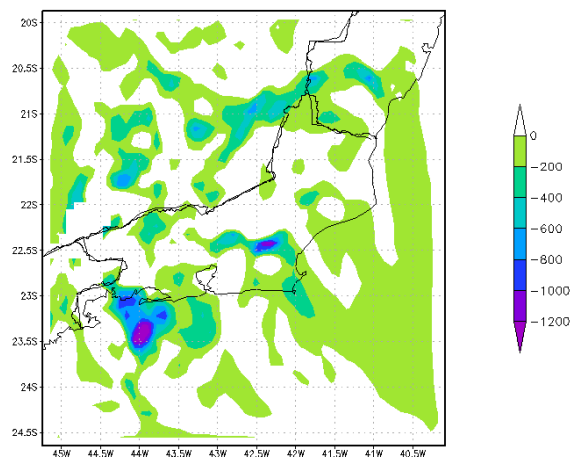
(a)



(b)

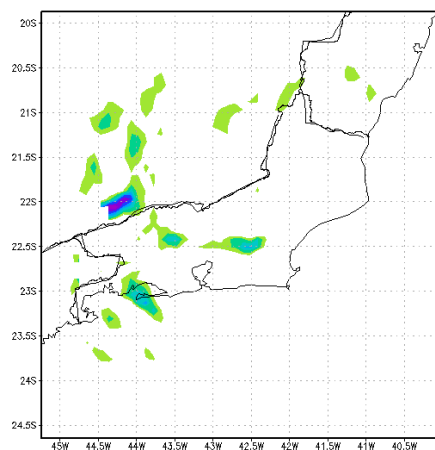


(c)

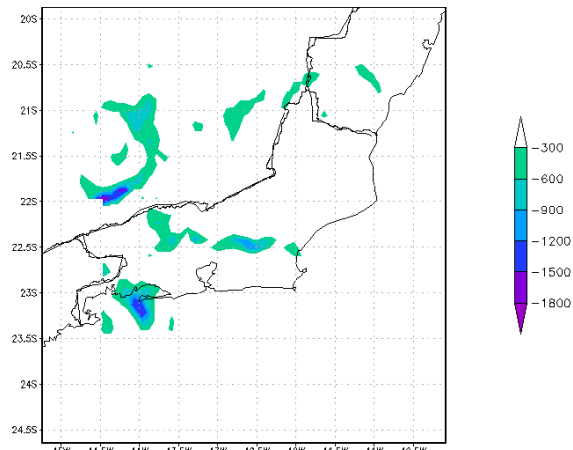


(d)

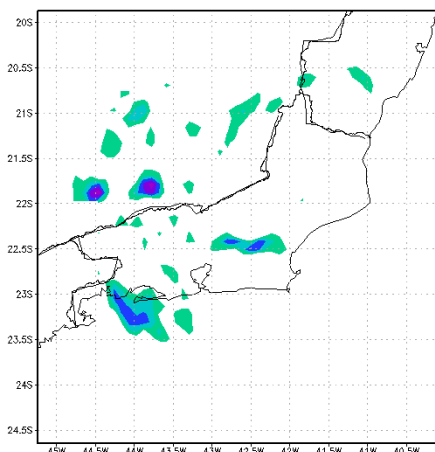
Figura 4.23: Índice CK às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22:00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (sem limiares).



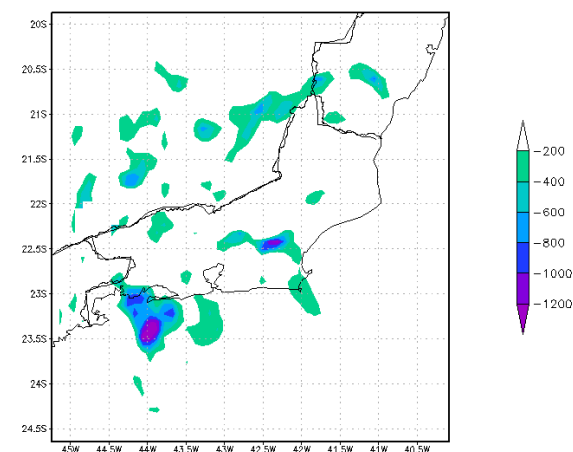
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.24: Índice CK às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22:00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (com limiares).

4.3.1.2. Índice CITT

Nos campos do índice CITT simulados pelo modelo WRF, verificou-se valores do CITT bem negativos a sudoeste do Município do Rio de Janeiro, em torno de $-1500 \cdot 10^{-6} \text{C/s}$ em quase todos os quatro horários (20:00Z, 21:00Z, 22:00Z e 23:00Z) mostrados caracterizando bem a alimentação do sistema pelos baixos níveis da atmosfera e mostrando as condições favoráveis à formação de nuvens convectivas similar aos campos do índice CK, tal fato deve-se à forte dependência que estes índices têm com a divergência nos baixos níveis. Ressalta-se que os valores de CITT observados pela modelagem para este caso de chuva extrema estavam abaixo do limiar estabelecido para este indicador (abaixo de $-87,1^\circ\text{C}$) caracterizando bem um sistema que teria potencial para provocar grandes acumulados de precipitação sobre o Município do Rio de Janeiro.

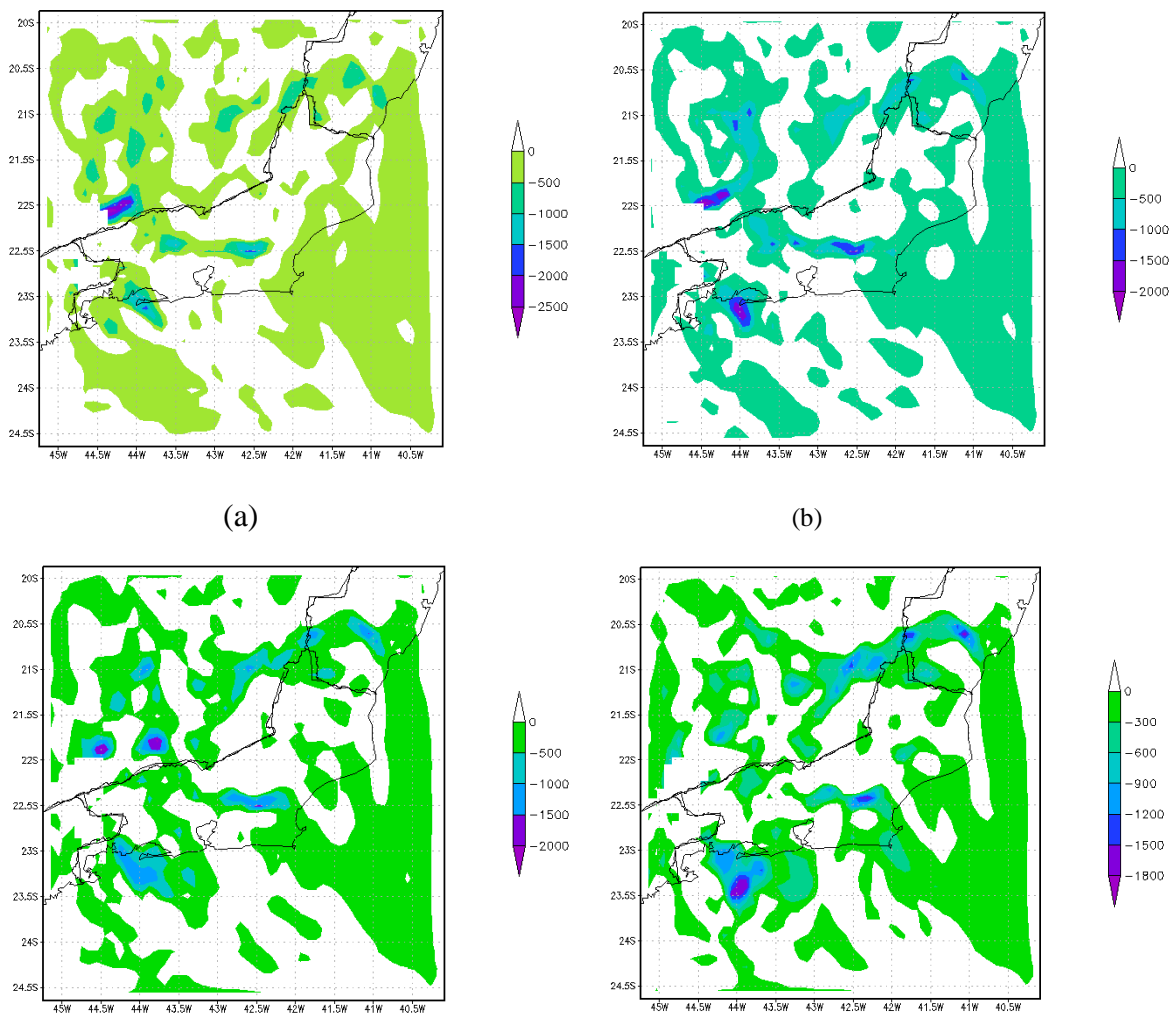
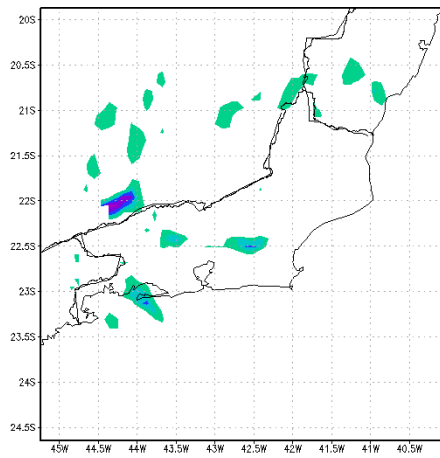
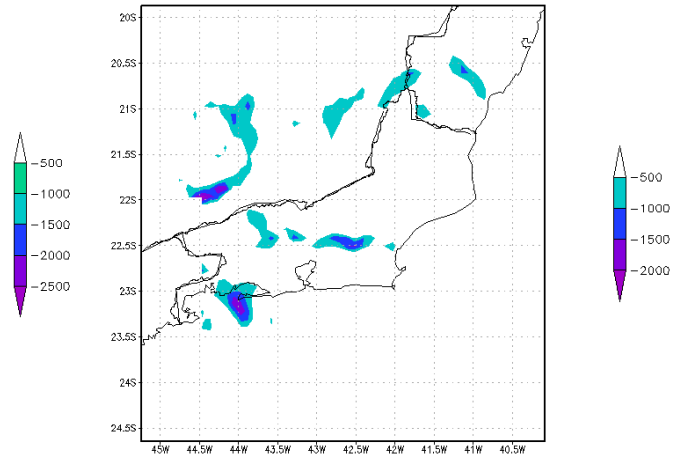


Figura 4.25: Índice CITT às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22:00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (sem limiares).



(a)



(b)

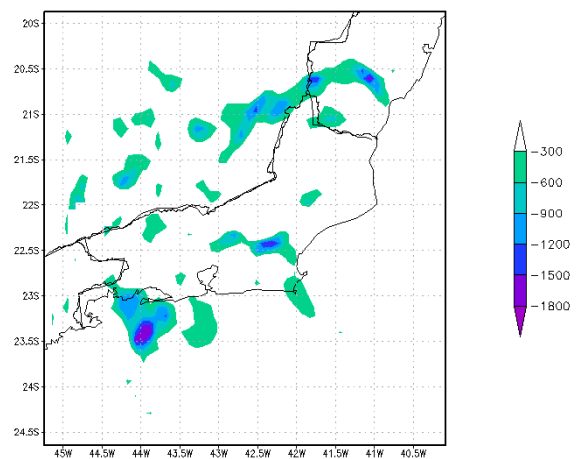
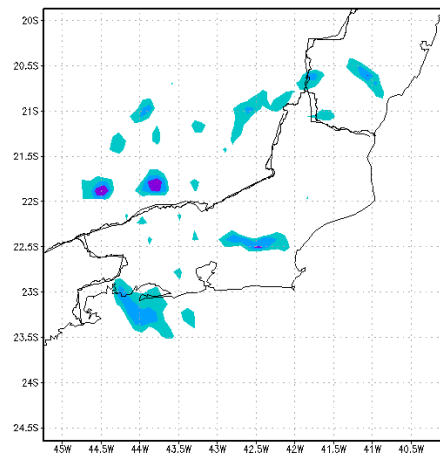


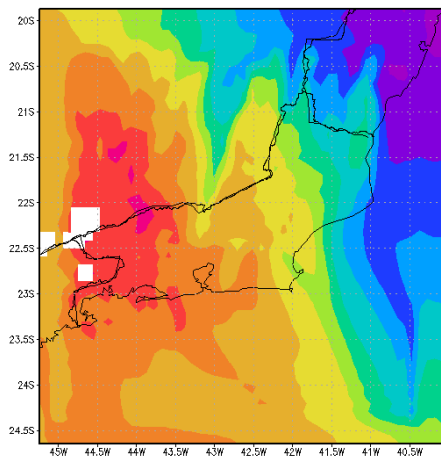
Figura 4.26: Índice CITT às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22:00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (com limiares).

4.3.1.3. Índice K

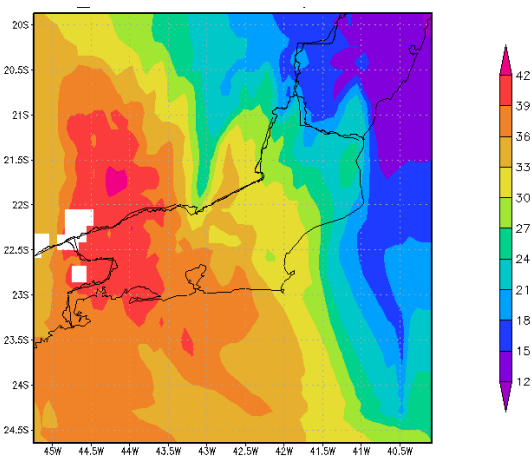
No campo do índice K simulado pelo modelo WRF, observa-se os maiores valores deste índice a sul do Município do Rio de Janeiro para os quatro horários mostrados na figura 4.31. Na simulação feita, verifica-se que para os horários mostrados para o índice K na região central do Município do Rio de Janeiro este índice não apresentou valores acima do limiar estabelecido para a ocorrência de chuvas extremas, acima de $34,7^{\circ}\text{C}$, mas na porção sul da região estudada observa-se valores maiores deste índice que caracterizavam a presença de um local favorável a formação de sistemas de caráter extremo.

Ressalta-se que é importante ser feita a análise do campo do índice CK juntamente com os campos do índice K, pois altos valores de CK podem estar associados à forte convergência nos baixos níveis e baixos valores de K dando pequenas regiões de “alarme falso”. Por isso, sempre ao se verificar o campo de CK é importante observar o campo de K.

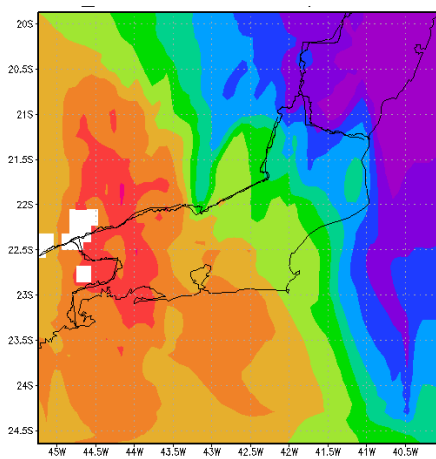
Analisando-se os campos das figuras 3.15 e 3.17, conclui-se que as regiões à sudoeste e sul do Município do Rio de Janeiro eram mais favoráveis ao desenvolvimento de tempestades severas.



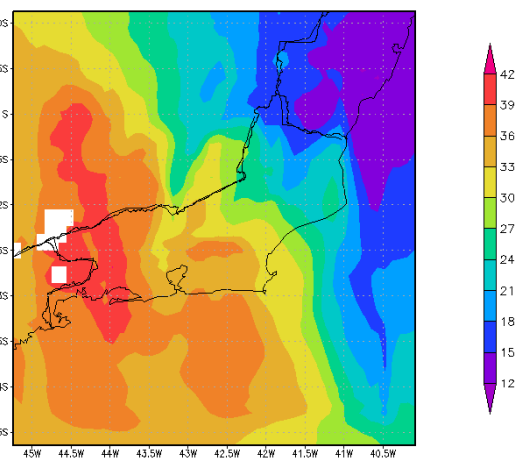
(a)



(b)

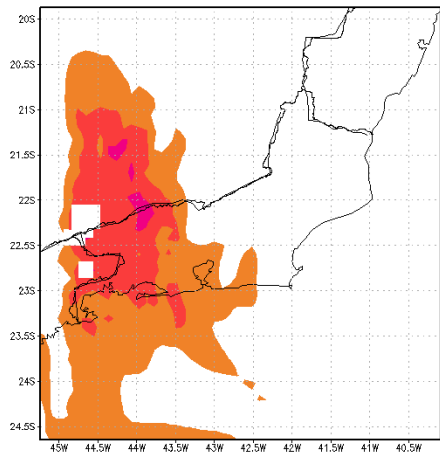


(c)

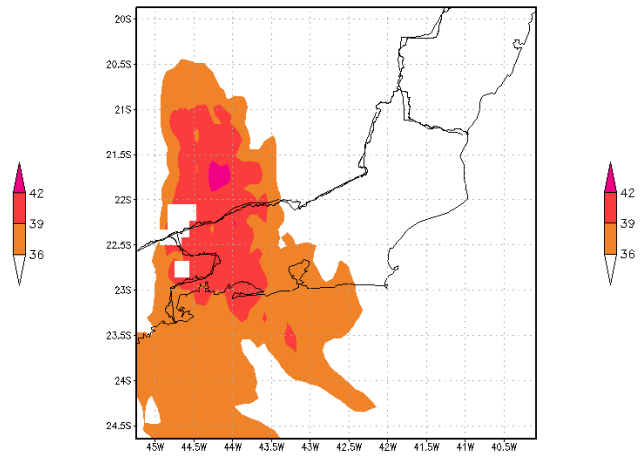


(d)

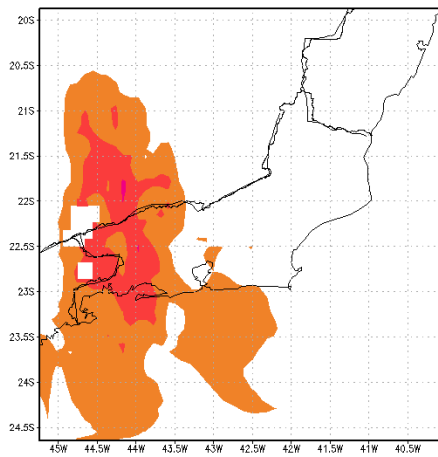
Figura 4.27: Índice K às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22:00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (sem limiares).



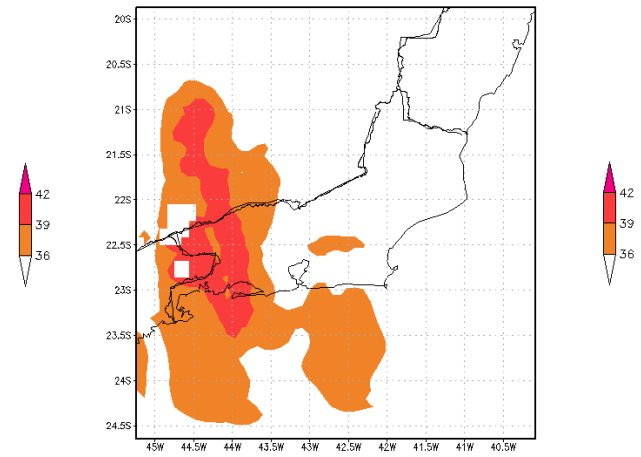
(a)



(b)



(c)



(d)

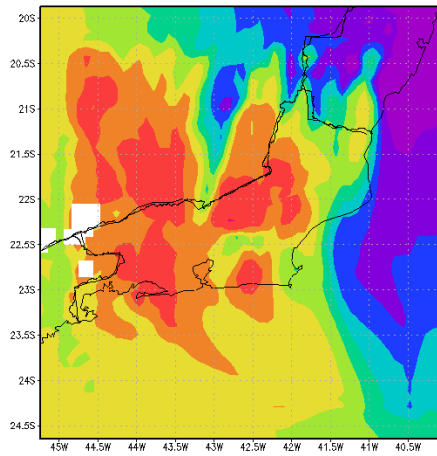
Figura 4.28: Índice K às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22:00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (com limiares).

4.3.1.4. Índice TT

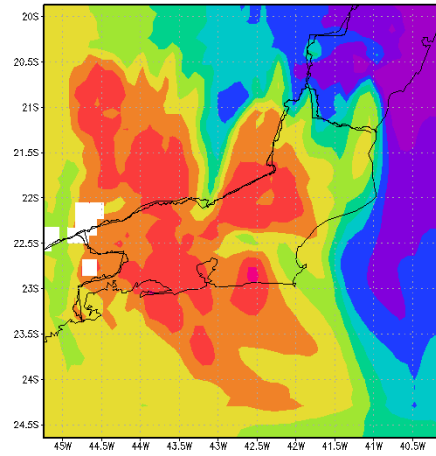
No campo do índice TT simulado pelo modelo WRF, observa-se os maiores valores deste índice sobre toda região os quatro horários mostrados na figura 4.32. Na simulação feita, verifica-se que para os horários mostrados para o índice TT sobre toda a região do Município do Rio de Janeiro este índice apresentou valores acima do limiar estabelecido para a ocorrência de chuvas extremas, acima de $44,7^{\circ}\text{C}$, que caracterizavam a presença de um local favorável a formação de sistemas de caráter extremo.

Ressalta-se que é importante ser feita a análise do campo do índice CITT, da mesma forma que o CK juntamente com os campos do índice TT, pois altos valores de CITT podem estar associados à forte convergência nos baixos níveis e baixos valores de TT dando pequenas regiões de “alarme falso”. Por isso, sempre ao se verificar o campo de CITT é importante observar o campo de TT.

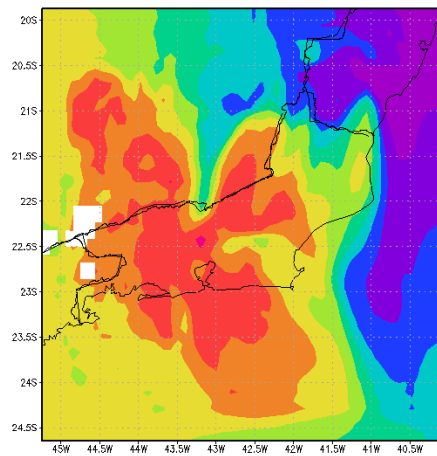
Analisando-se os campos da figura 4.32, verificou-se que as regiões à sudoeste e sul do Município do Rio de Janeiro eram mais favoráveis ao desenvolvimento de tempestades severas.



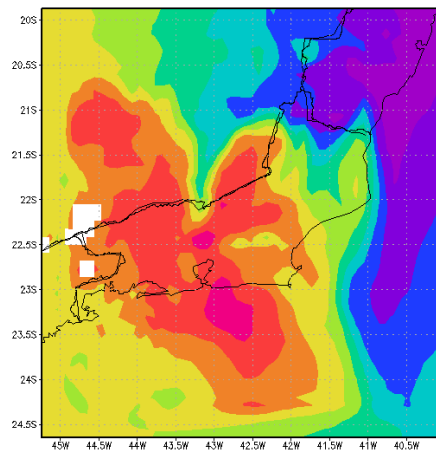
(a)



(b)

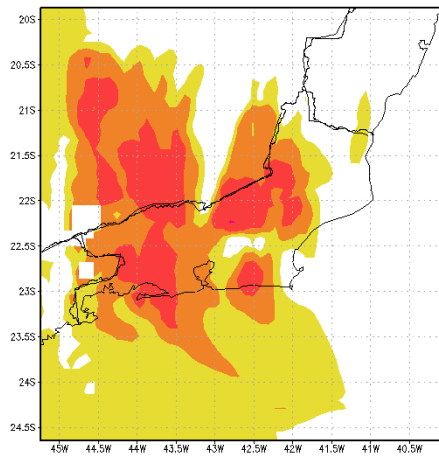


(c)

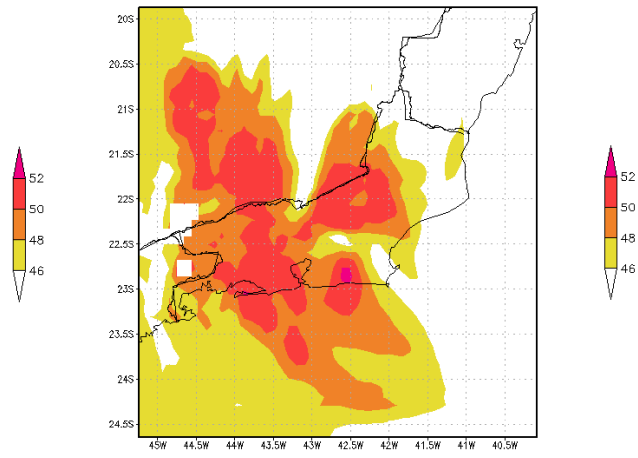


(d)

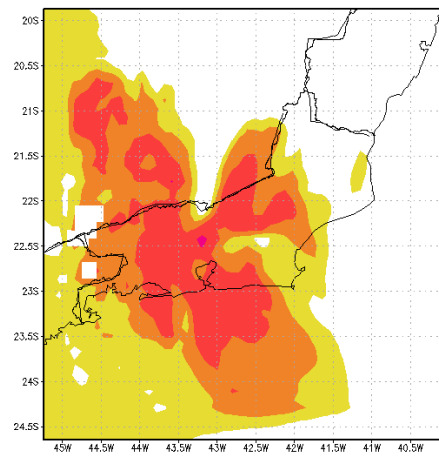
Figura 4.29: Índice TT às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22:00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (sem limiares).



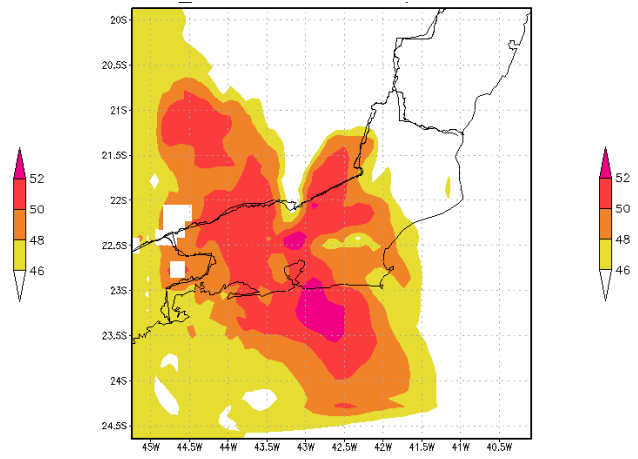
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.30: Índice TT às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22:00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (com limiares).

4.3.1.5. Índice LR (500-700)hPa

No campo do índice LR entre 500 e 700hPa simulado pelo modelo WRF, observa-se na Figura 4.33 os maiores valores deste índice a sudoeste e sul da região estudada para os quatro horários caracterizando a instabilidade presente no dia que favoreceu a ocorrência deste sistema sobre o Município do Rio de Janeiro. Observa-se que os valores obtidos deste índice para os quatro horários estudados estavam acima de limiar estabelecido para o mesmo, ou seja, acima de $6,10^{\circ}\text{C}/\text{Km}$.

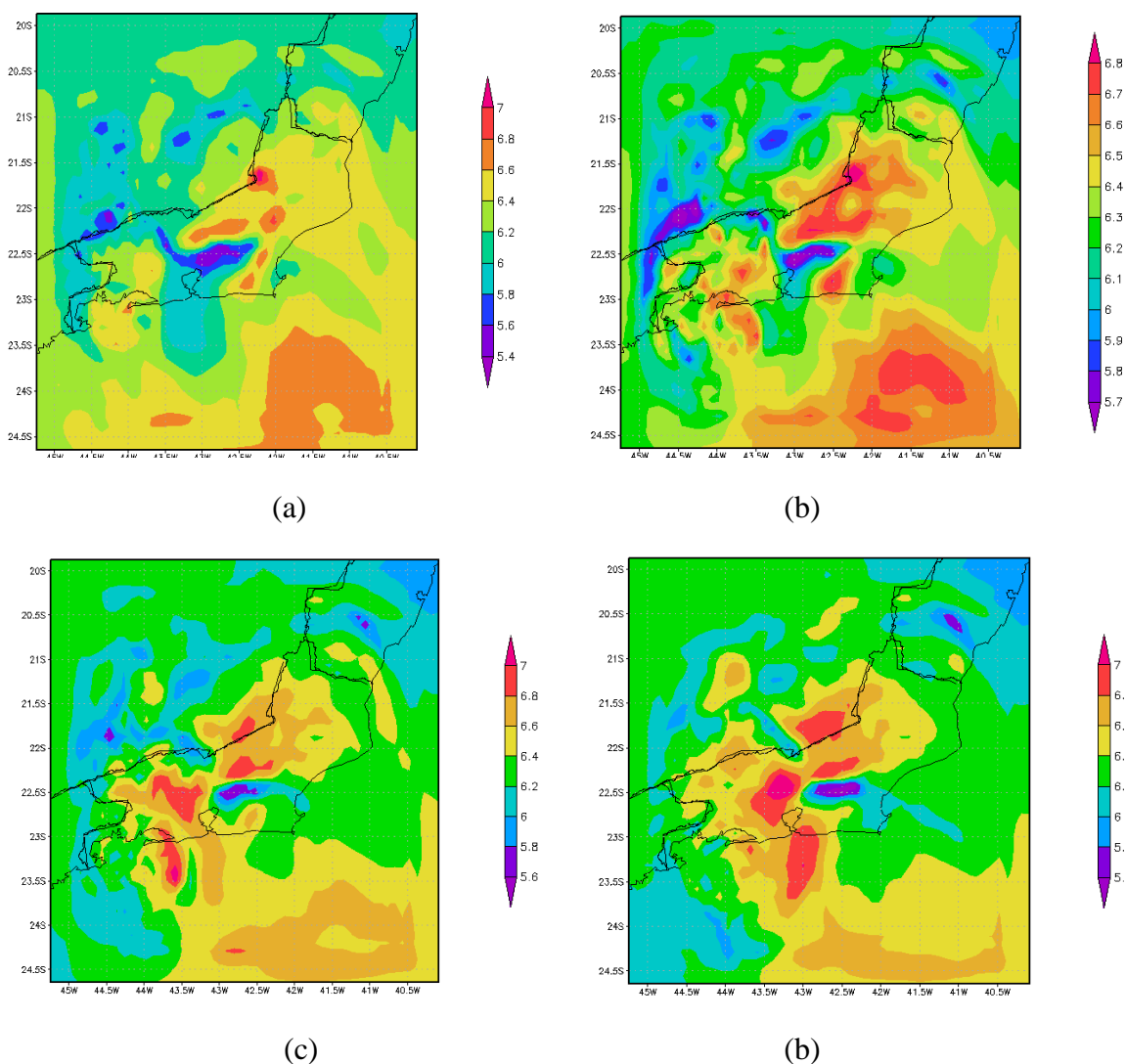


Figura 4.31: LR entre (500-700)hPa às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22:00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (sem limiares).

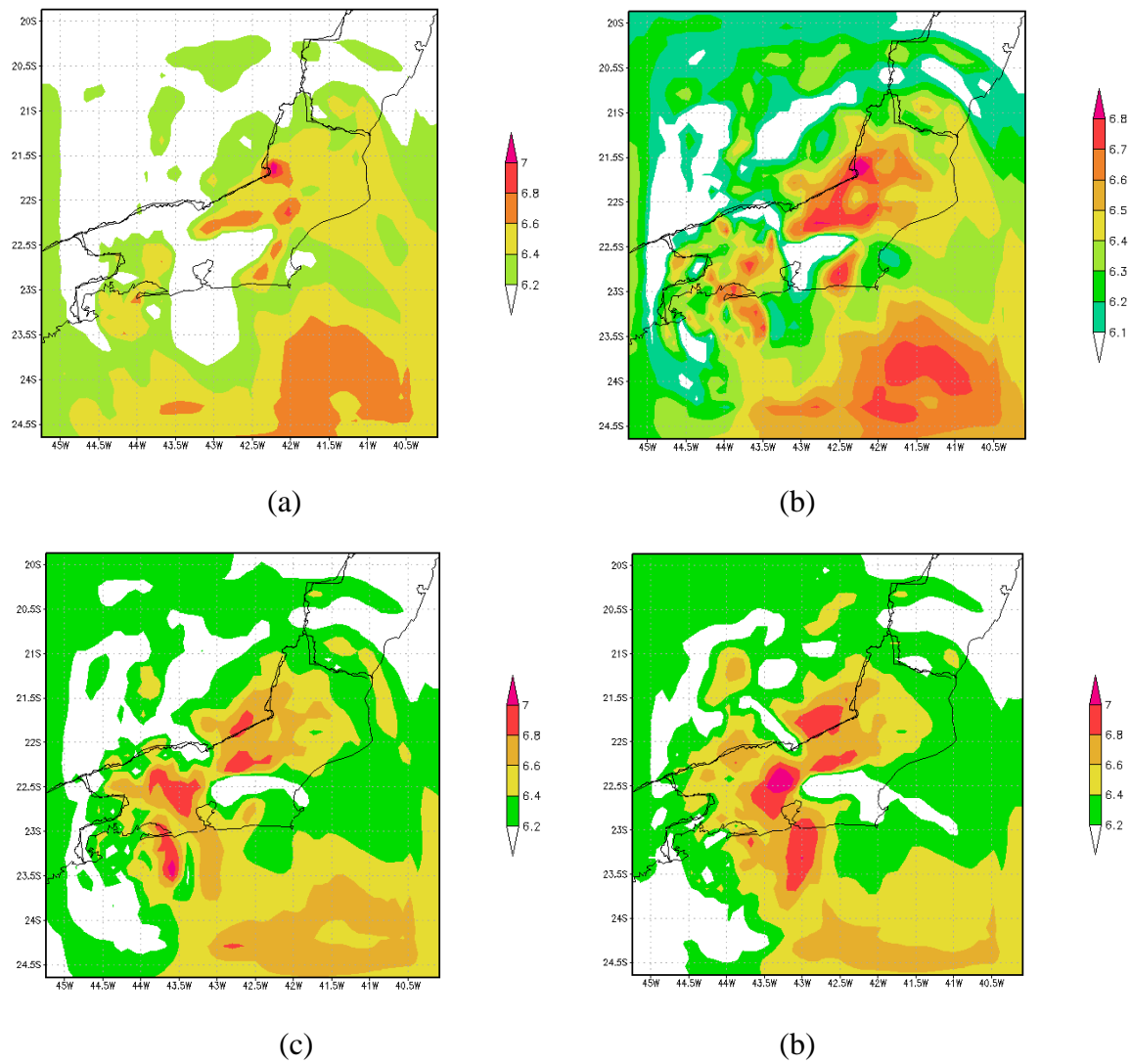


Figura 4.32: LR entre (500-700)hPa às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22:00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (com limiares).

4.3.1.6. Divergência em 850hPa

No campo da divergência em 850hPa simulado pelo modelo WRF, observa-se na figura 4.34 que os maiores valores negativos deste indicador a sudoeste e sul da região estudada para os quatro horários caracterizando a forçante dinâmica nos baixos níveis que foi mais um “ingrediente” para a formação de células convectivas intensas sobre os horários mostrados nas imagens de satélite. Observa-se que os valores obtidos deste índice estavam bem negativos para os quatro horários estudados, por volta de $-30,0 \text{ s}^{-1}$ condizendo com o limiar estabelecido para este indicador, ou seja, abaixo de $-2,7 \text{ s}^{-1}$.

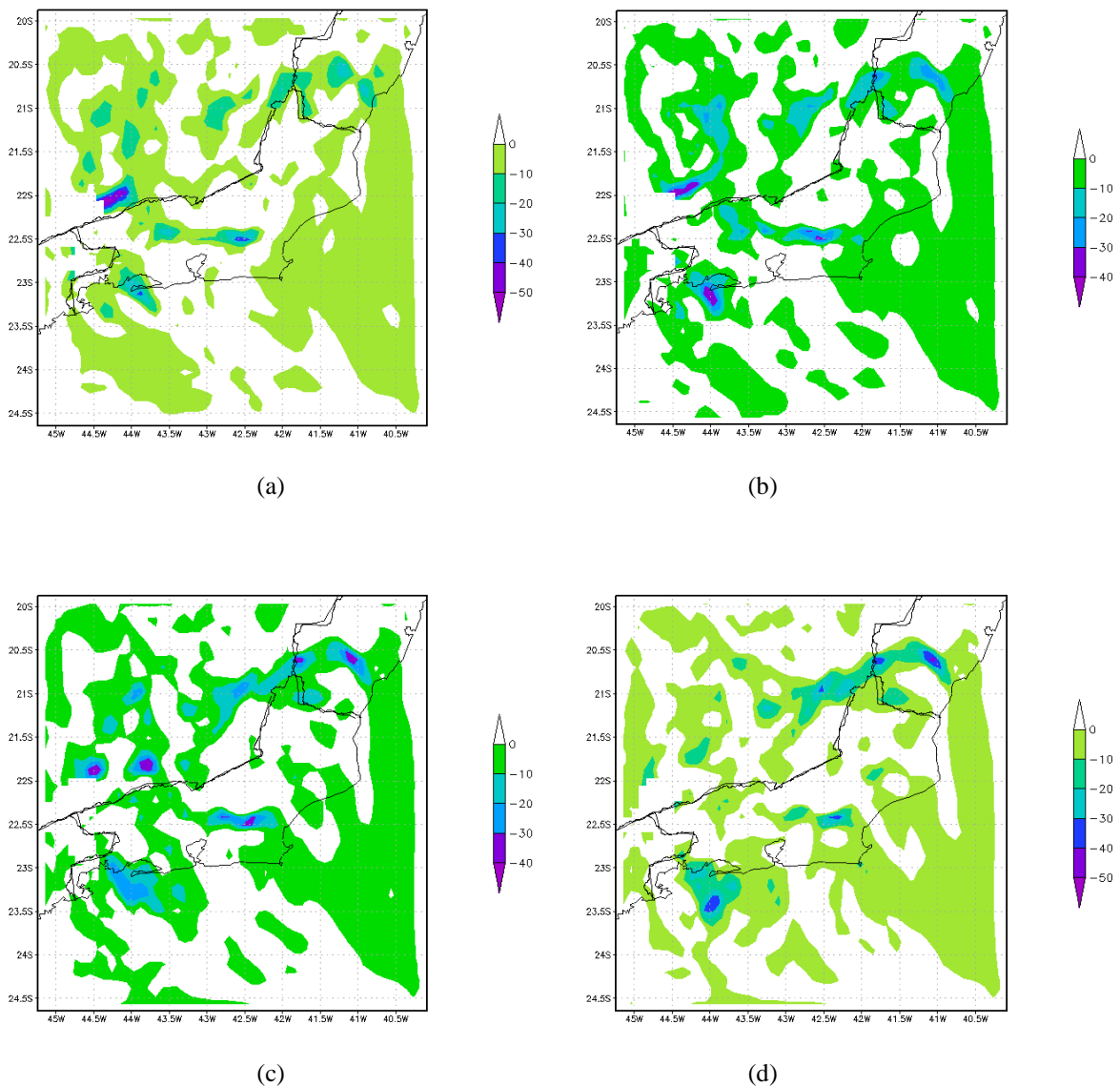
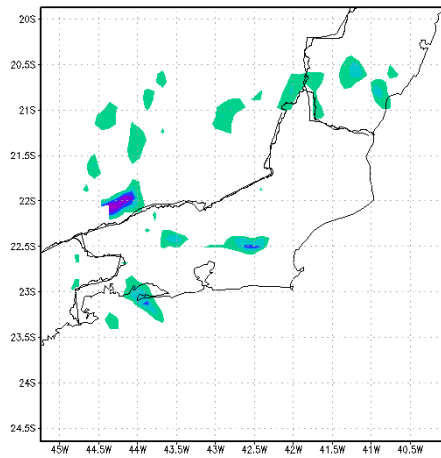
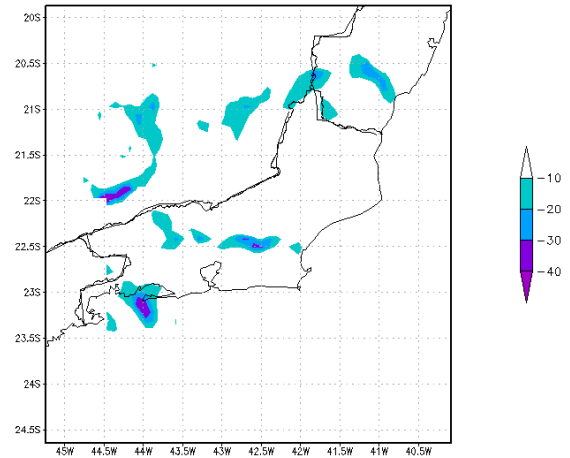


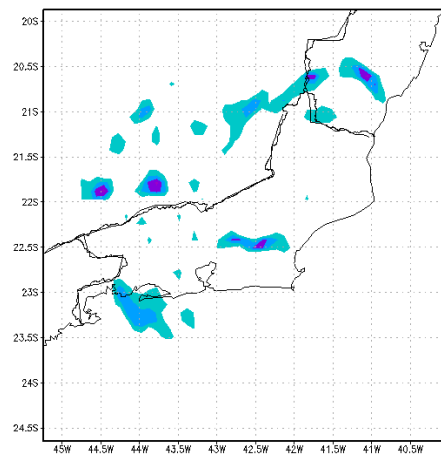
Figura 4.33: Divergência em 850hPa às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22:00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (sem limiares).



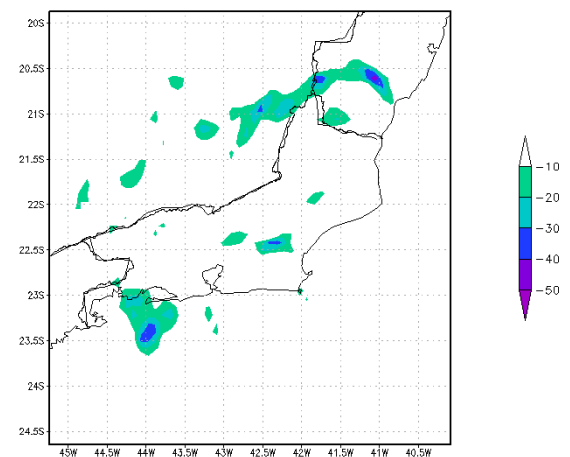
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.34: Divergência em 850hPa às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22:00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF (com limiares).

4.3.1.7. Divergência em 250hPa

No campo da divergência em 250hPa simulado pelo modelo WRF, observa-se os maiores valores deste indicador sobre toda a região estudada para os quatro horários caracterizando a forçante dinâmica nos altos níveis também estava favorecendo a formação de células convectivas e caracterizando a grande estrutura vertical do sistema como pôde que foi mais um “ingrediente” para a formação de células convectivas intensas sobre os horários mostrados nas imagens de satélite. Observa-se que os valores obtidos deste índice estavam altos para os quatro horários estudados, por volta de 40 s^{-1} , condizendo com o limiar estabelecido para este indicador, ou seja, abaixo de $2,84 \text{ s}^{-1}$.

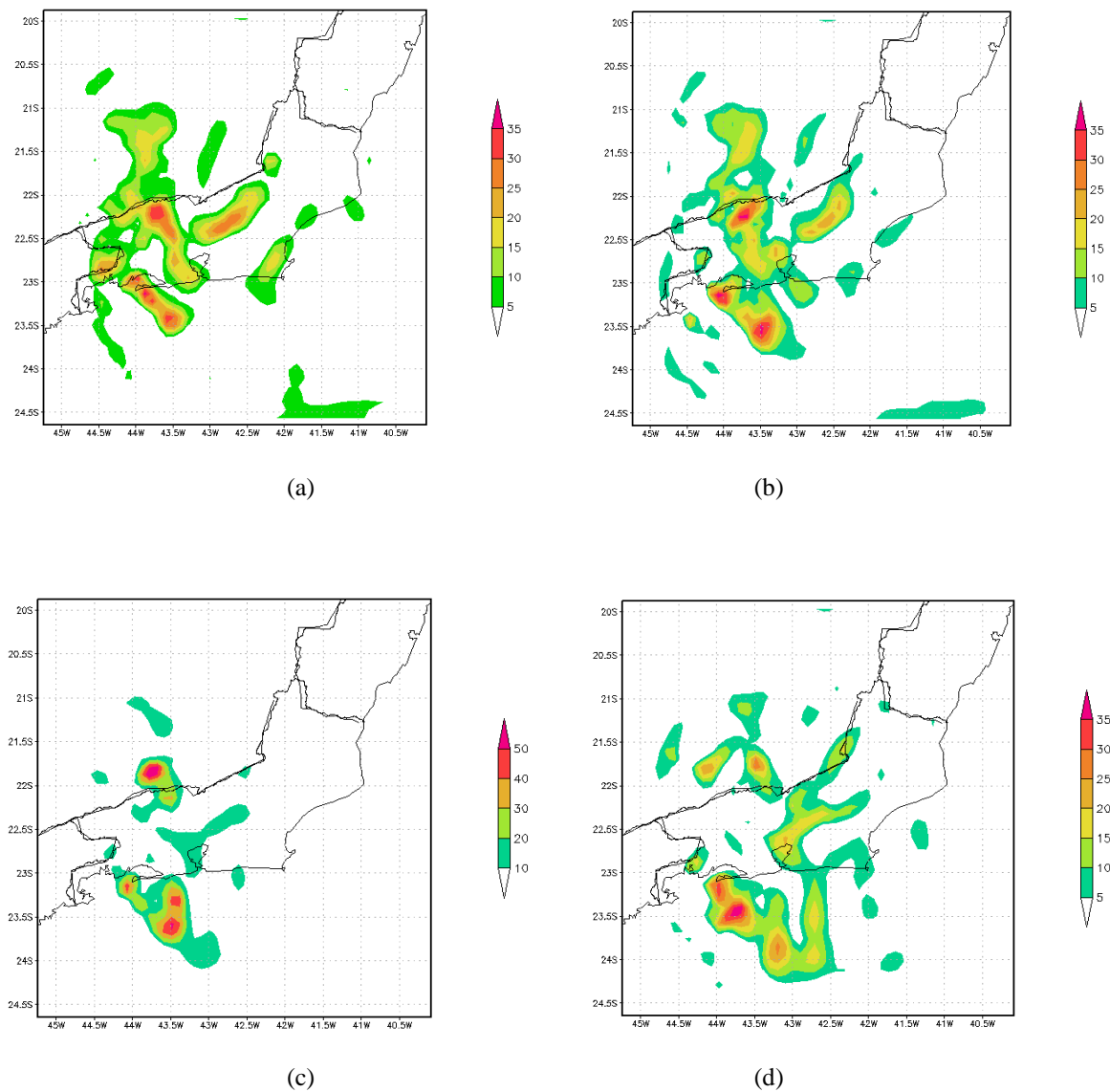


Figura 4.35: Divergência em 250hPa às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22:00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF.

4.3.1.8. Movimento Vertical em 500hPa

No campo do Movimento Vertical em 500hPa simulado pelo modelo WRF, observa-se os maiores valores deste indicador sobre toda a região estudada para os quatro horários caracterizando a forçante dinâmica nos médios níveis também estava favorecendo a formação de células convectivas e caracterizando a grande estrutura vertical do sistema como pôde que foi mais um “ingrediente” para a formação de células convectivas intensas sobre os horários mostrados nas imagens de satélite. Uma análise conjunta dos três níveis mostra que este sistema teve grande suporte dinâmico acoplados entre si. Observa-se que os valores obtidos deste índice estavam altos para os quatro horários estudados, por volta de 1m/s, condizendo com o limiar estabelecido para este indicador, ou seja, acima de 0,034m/s.

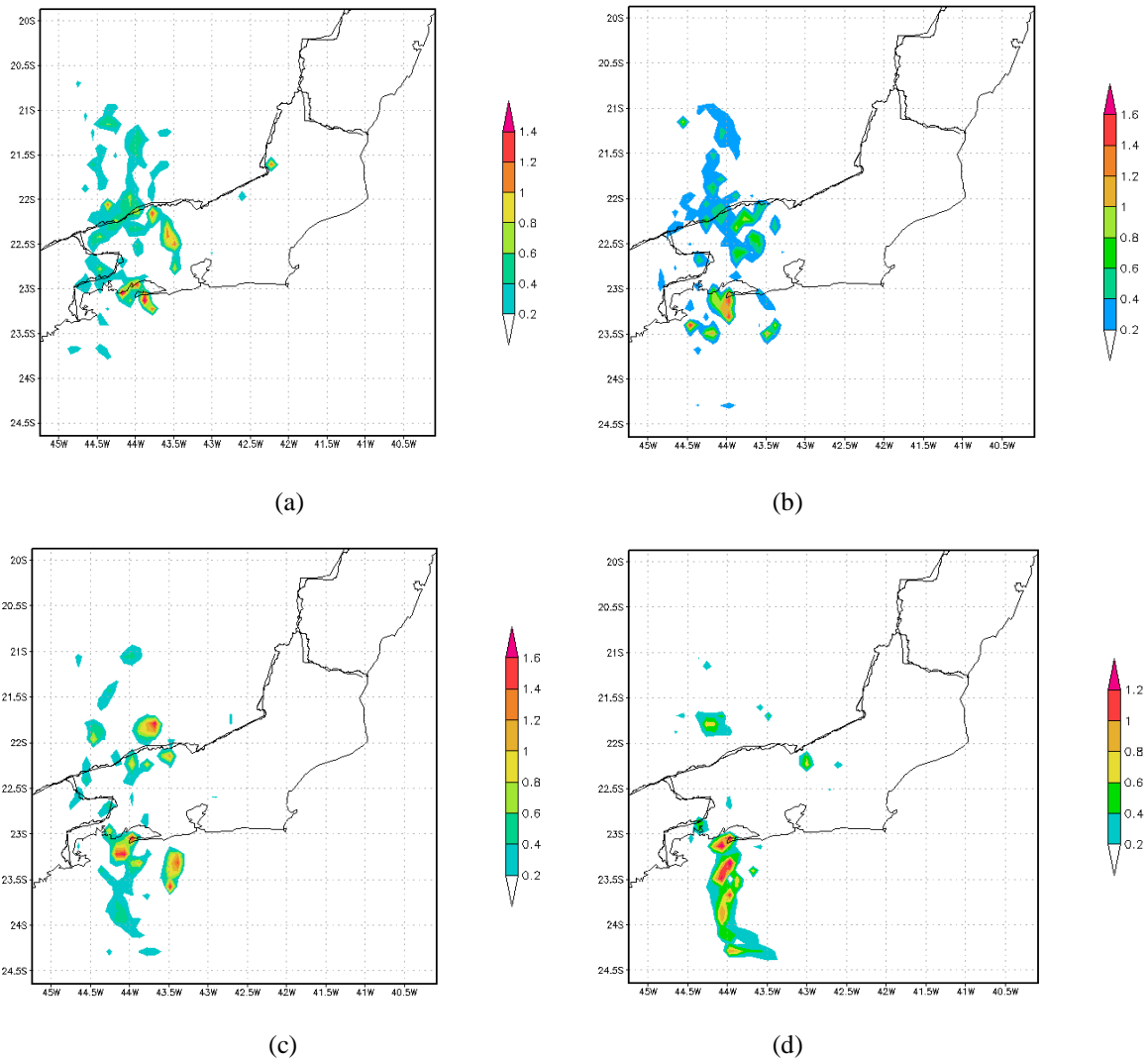


Figura 4.36: Movimento Vertical em 500hPa às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22:00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF.

4.3.1.9. Pressão ao Nível Médio do Mar

No campo da Pressão ao Nível médio do Mar simulado pelo modelo WRF, observa-se um pequeno centro de baixa pressão próximo ao Município do Rio de Janeiro. Como se sabe, sistemas de baixa pressão estão associados a movimento ascendente do ar, logo, a presença deste centro de baixa pressão deu mais um suporte dinâmico para este sistema que ocasionou num caso de chuva extrema sobre o Município do Rio de Janeiro.

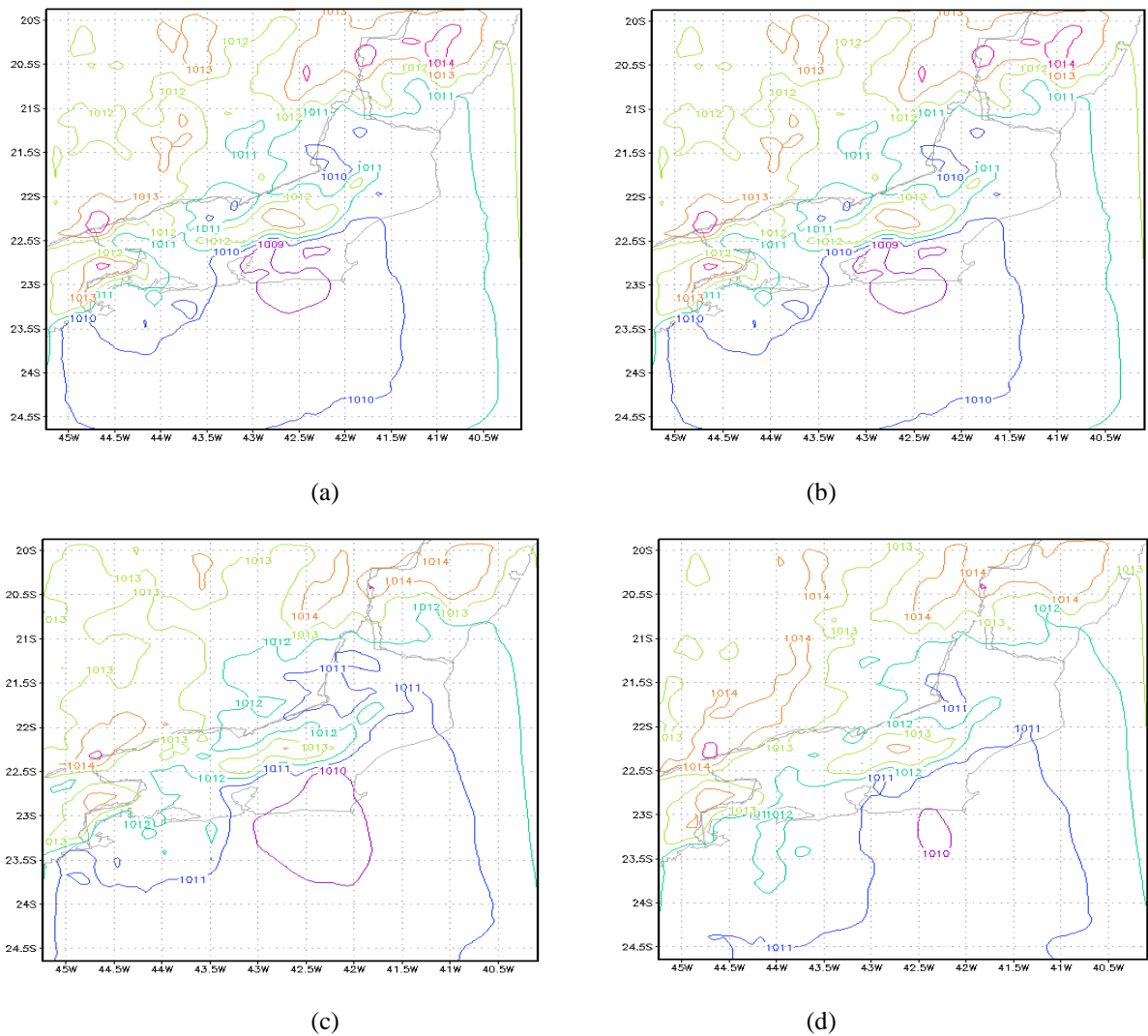


Figura 4.37: Pressão ao nível médio do mar às 20:00Z (a), 21:00Z (b), 22:00Z (c) e 23:00Z (d) do dia 21/03/2003 simulados pelo modelo WRF.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados neste trabalho, verificou-se que os modelos numéricos da atmosfera subestimam a quantificação da precipitação, variável esta que caracterizaria de forma direta eventos de chuvas extremas. Sendo assim, a identificação de possíveis sistemas de caráter extremo sobre o Município do Rio de Janeiro a partir da quantificação da precipitação torna-se ineficiente. Mas verificou-se que os indicadores de chuvas extremas são ferramentas muito úteis na identificação de sistemas meteorológicos de caráter severo e em conjunto, observou-se que estes mesmos indicadores se comportavam de forma diferenciada para cada evento e até mesmo localmente. Portanto, valores típicos que caracterizassem sistemas atmosféricos de alto potencial de destruição localmente eram um tanto arbitrários.

Segundo estudos mostrados neste trabalho, notou-se que os valores pré-estabelecidos e amplamente conhecidos destes índices (por exemplo, índice K acima de 40°C) que caracterizam sistemas atmosféricos de caráter extremo foram feitos através de estudos de ocorrência de tempestades severas para uma região específica dos EUA e que tais valores, portanto, não seriam bem representativos para qualquer outra região como, por exemplo, o Município do Rio de Janeiro. Logo, entende-se que estudos estatísticos dos dias de ocorrência de tempestades severas para outras regiões são necessários para que valores típicos do disparo dos indicadores atmosféricos sobre diferentes regiões sejam encontrados, ou seja, valores regionalizados, sendo mais úteis na identificação local de possíveis sistemas de caráter severo.

Diante disso, parâmetros estatísticos foram submetidos aos nove indicadores apresentados neste trabalho para todos os dias de ocorrência de chuvas extremas sobre o Município do Rio de Janeiro no período de 1997-2008, e assim, limiares foram estabelecidos dos mesmos foram estabelecidos especificamente para o Município do Rio de Janeiro. Foram analisados quase que 2.000.000 milhões de dados destes indicadores e verificou-se que os valores destes novos limiares obtidos a partir da modelagem numérica caracterizam de forma mais adequada do que os pré-estabelecidos para tempestades severas nos EUA. Podendo assim, auxiliar os meteorologistas previsores nas medidas de precaução das possíveis ocorrências destes sistemas sobre o Município do Rio de Janeiro.

Através das tabelas da comparação dos limiares com os quartis de cada caso notou-se que nem sempre os indicadores de tempestades severas caracterizavam o potencial de um possível evento, por exemplo, o caso 02/12/2005 onde os valores regionalizados de cada um dos indicadores não caracterizou a ocorrência deste evento extremo de precipitação. Notou-se juntamente, através da Tabela 4.2, que os índices CK e CITT foram os mais representativos na identificação dos sistemas severos. Acredita-se que isso se deva justamente ao fato de que estes índices combinam os aspectos dinâmicos e termodinâmicos presentes na atmosfera evidenciando, portanto, a importância dos mesmos como um auxílio na diminuição das incertezas dos altos valores dos índices K e TT que possam acontecer comumente chamados de “alarmes falsos” ou “falsos positivos”, e no aumento da certeza do desenvolvimento e posicionamento de tempestades severas, como foi verificado nos índices CK e CITT, a partir de um acompanhamento das previsões destes índices.

6. Referências Bibliográficas

- ANDRADE, F. M.; OLIVEIRA, A. N e MARTON, E. Evento ZCAS no verão de 2005/2006 e suas relações com as oscilações intrazonais. In XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis, 2006, p. 551-600.
- BARCELLOS, P. C. L.: PRECIPITAÇÕES INTENSAS NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO: PROBABILIDADE E PREVISIBILIDADE. (2009). Dissertação de Mestrado. COPPE. Rio de Janeiro. Março de 2009.
- BENETI, C. A. e M. A. F. SILVA DIAS, 1986, “Análise da performance de índices de instabilidade como previsores de tempestades na região de São Paulo” . In: Anais do IV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Brasília, DF, Sociedade Brasileira de Meteorologia, v.2, pp. 65-70.
- CARVALHO, T; JUSTI DA SILVA, M. G. A; COELHO, D. G; TOZZI, L. R. L; SANTOS, I. A; SILVA, A. S. Reconstituição de Séries de Campos Meteorológicos com Alta Resolução Espacial para o Estado do Rio de Janeiro: Uma Avaliação Preliminar da Precipitação Simulada no Rio de Janeiro. In: XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2008, São Paulo. Anais do XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2008.
- CERQUEIRA, F. A.: “Avaliação do modelo ETA Durante Episódios de ZCAS”. Rio de Janeiro, UFRJ. 2006 (monografia).
- CHAVES, R.R. e SATYAMURTI, P.: Estudo das condições regionais associadas a uma evento de forte ZCAS em janeiro de 2003. In XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis, 2006, p. 451- 500.
- CHEN, F., and J. DUDHIA, 2001: Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. Mon. Wea. Rev., in press.
- DERECZYNSCKI, C. P; OLIVEIRA, J. S e MACHADO, C. O. Climatologia da Precipitação no Município do Rio de Janeiro in Revista Brasileira de Meteorologia, volume 24, número 1, páginas 24-38 .

- ESCOBAR, G.; ANDRADE, K., : Climatologia dos índices K e Total Totals (TT) para o Sul e Sudeste do Brasil. In Anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Bélem – Pará.
- GUIA, C. V. F., MOURÃO, C. E. F., ROBALINHO, L. H. D., GROSSMANN, K. S., MENEZES, W. F. Estudo Observacional e Numérico do Sistema de Tempestades de Caráter destrutivo que atingiu o Rio de Janeiro no Dia 27 de janeiro de 2006 In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2006, Florianópolis - SC. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia. , 2006.
- GEORGE, J. J. Weather Forecasting for Aeronautics. Academic Press, 673 pp.,1960.
- GIORGI, F., and X. Bi, 2000: A study of internal variability of a regional climate model. *J. Geophys. Res.*, 105, 29 503–29 521
- GOTTLIEB, R. J; & WYSOCKI, M, W (2009).: Analysis of Stability Indices for Severe Thunderstorms in the Northeastern United States in Honors Thesis presented to the College of Agriculture and Life Sciences, Physical Sciences of Cornell University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Research Honors Program.
- GRELL, G. A.; DEVENYI, D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.*, v. 29(14), p. 1693, 2002.
- GRELL, G. A., S. A. MCKEEN, J. MICHALAKES, J.-W. BAO, M. TRAINER, and E.-Y. HSIE, 2002: Real-time simultaneous prediction of air pollution and weather during Houston 2000 Field Experiment. *Preprints of the 4th Conference on Atmospheric Chemistry*, AMS, 13-17 January 2002, Orlando, Florida.
- GROSSMAN, K. S., “ESTUDO DA COMBINAÇÃO DE ÍNDICES DE INSTABILIDADE COMO FERRAMENTA DE AUXÍLIO NA PREVISÃO DE TEMPO”. Rio de Janeiro, UFRJ. 2010 (monografia).
- HONG, S.-Y., H.-M. H. JUANG, and Q. ZHAO, 2004: Implementation of prognostic cloud scheme for a regional spectral model, *Mon. Wea. Rev.*, 126, 2621-2639. .

- HONG, S.-Y., H and LIM, J. O. J, and Q. ZHAO, 2006: The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme (WSM6) in Journal of the Korean Meteorological Society 42, 2, 2006, p. 129-151.
- JANJIC, Z. I., 1996a: The surface layer in the NCEP Eta Model. Eleventh Conference on Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, 19-23 August 1996; Amer. Meteor. Soc., Boston, MA, 354-355.
- JANJIC, Z. I., 2002: Nonsingular Implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model. NCEP Office Note No. 437, 61 pp.
- JOHNS, R. H.; DOSWELL, C. A.: Severe local storms forecasting. Weather Forecasting, v. 7, p. 588-612, 1992.
- KALNAY,E., KANAMITSU,M., KISTLER, R., COLLINS, W., AND OTHER. 1996. "The NCEP/NCAR 40- year reanalysis project." Bulletin of the American Meteorological Society, 77 (3), 437-471
- KAIN, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. J. Appl. Meteor., 43, 170–181.
- KISTLER, R., KALNAY, E., Collins, W. and many others, 2001: The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation, AMS Bull. 82(2), 247-267.
- LIMA, D. R. O., 2005: “Diagnóstico de chuvas e previsão meteorológica para a bacia hidrográfica do rio Manso”. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, RJ, Brasil.
- MENEZES, W. F. e M. A. F. SILVA DIAS, 1998, “Simulação numérica das tempestades ocorridas no estado de São Paulo em 14 de maio de 1994: O caso Ribeirão Preto”, In: Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia, outubro de 1998, Brasília – DF.
- MENEZES, W. F., PAIVA, L. M. S., JUSTI DA SILVA, M. G. A. e M, BELASSIANO, 2000: Estudo do ambiente favorável à propagação de sistemas convectivos de mesoescala sobre o Município do Rio de Janeiro. In Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, 2000.

- MICHALAKES, J., S. Chen, J. DUDHIA, L. Hart, J. KLEMP, J. MIDDLECOFF, and W. SKAMAROCK (2001): *Development of a Next Generation Regional Weather Research and Forecast Model. Developments in Teracomputing: Proceedings of the Ninth ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*. Eds. Walter Zwiefelhofer and Norbert Kreitz. World Scientific, Singapore. pp. 269-276.
- MILLER, R. C. Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. Tech. Report 200, Air Weather Service, United States Air Force, 190 pp., 1972.
- MILLS, G. A. and COLQUHOUN, J. R., 1998: Objective Prediction of Severe Thunderstorm Environments: Preliminary Results Linking a Decision Tree with an Operational Regional NWP Model. in *Journal of the Australian Meteorological Society* 13, 1998.
- MLAWER, E. J., S. J. TAUBMAN, P. D. BROWN, M. J. IACONO, and S. A. CLOUGH, 1997: Radiative trans-fer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave. *J. Geophys. Res.*, 102(D14), 16663-16682.
- MORAES, N. O. Análise Preliminar de evento ZCAS no verão de 2001/2002. In XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz do Iguaçu, 2002, p. 21-100.
- MOURÃO, C. E. F e LIMA, G. D. Estudo observacional e numérico do evento de precipitação ocorrido em 21 de março de 2003 sobre a cidade do Rio de Janeiro. In XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Fortaleza, 2003, p. 301-350.
- MOURÃO, C. E. F.: “Estudo do Comportamento de Indicadores de Tempo Severo em Casos de Tempestades Sobre o Rio de Janeiro Utilizando o Modelo RAMS”. Dissertação de Monografia. Departamento de Meteorologia – Instituto de Geociências – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 93p. (2007)
- MOURÃO, C. E. F, 2009: ESTUDO NUMÉRICO DA PRODUÇÃO DE CHUVAS INTENSAS NA REGIÃO DA SERRA DO MAR PAULISTA. Tese de Mestrado. CPTEC/INPE.
- NASCIMENTO, E. L. Identifying severe thunderstorm environments in southern Brazil: analysis of severe weather parameters. In: Preprints, 22nd Conf. Severe Local Storms, Hyannis, EUA, Amer. Met. Soc., em mídia digital, 2004.

- NASCIMENTO, E. L., 2005: “Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil?”. *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 20 (1), p. 121-140.
- NASCIMENTO, M. X.; GROSSMAN, K. S., MENEZES, W. F.;; Aplicação de Indicadores de Tempo Severo na Caracterização de um Ciclone Intenso. In *Anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Bélem – Pará. 2010
- OLIVEIRA, I.C., 2003: Estudo de configurações de parametrizações físicas num modelo numérico de mesoescala via estudo de caso. Trabalho Final de Monografia. Departamento de Meteorologia – Instituto de Geociências – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 101pp.
- PEREIRA, T. R. A., 2004: Uma análise da Sensibilidade do Modelo MM5 na Detecção e Previsão de Sistemas Meteorológicos de Chuvas Intensas em Diferentes Escalas. Trabalho Final de Monografia. Departamento de Meteorologia – Instituto de Geociências – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 78p.
- PESQUERO, F. J.; Chou, S. C.; Nobre, C. A. N.; Marengo, J.A., 2009. Climate downscaling over South America for 1961-1970 using the Eta Model. *Theor. Appl. Climatol.*, published on line 11 March 2009. Doi: 10.1007/s00704-009-0123-z.
- POLIFKE DA SILVA, F. e JUSTI DA SILVA, M. G. A., :Chuvas Severas no Município do Rio do Janeiro: Simulação numérica dos casos de 2007. In *Anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Bélem – Pará.
- PINHEIRO, F. M. A; MARQUES, V. S; ANDRÉ, R. G. B e MANHAES, S. X. Analise do evento meteorológico severo ocorrido em 7 de setembro de 2002. In *XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Florianópolis, p. 51-100.
- QIAN, J.-H., SETH, A., and ZEBIAK, S. 2003: Reinitialized versus continuous simulations for regional climate downscaling. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 2857-2874.
- SEABRA, M. S; MENEZES. W. F. e FILHO, O. C. R. Estudo do impacto da ocorrência da zona de convergência do Atlântico Sul na vazão de bacias hidrográficas nas regiões sudeste e centro-oeste – O caso de fevereiro de 2002. In *XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Fortaleza, 2004, p. 301-350.

SILVA DIAS, M.A.F., 2000: “Índices de Instabilidade Para Previsão de Chuva e Tempestades Severas”. Departamento de Ciências Atmosféricas, Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo.

STAROSTIN, A; GOMES, A. M; ÁVILA, V. D; ZHELMIN, A; GEMIACKI, L e STAROSTINA, T. Estrutura e evolução do sistema convectivo de mesoescala ocorrido sobre o estado de São Paulo no dia 16 de Fevereiro de 2000. In XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz do Iguaçu, 2002, p. 201-250.

TOMAZIELLO, A. C. N. e GANDU, A. W. 2006: ANÁLISE ESTATÍSTICA DE ÍNDICES DE INSTABILIDADE TERMODINÂMICA EM SÃO PAULO . In Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis, 2006.

APÊNDICE

Breve descrição das parametrizações do modelo WRF usadas nesta pesquisa

As opções físicas do WRF são contidas em cinco categorias: (1) microfísica, (2) parametrização de cúmulos, (3) camada superficial (4) modelo solo-superfície, (5) camada limite planetária e (6) radiação. Em cada uma destas categorias estão incluídas várias opções. No presente trabalho foram usadas as parametrizações sumarizadas a seguir:

I.1 – Microfísica

A microfísica inclui a resolução explícita dos processos que envolvem o vapor d'água, as nuvens e a precipitação. O modelo é geral o suficiente para acomodar qualquer número de variáveis de massa de razão de mistura e outros momentos tais como números de concentração.

A tabela I.1 mostra as opções de microfísica disponível de variáveis de umidade e se estão ou não incluídos os processos de fase-gelo e de fase-mista. Os processos de fase-mista são aqueles que resultam da interação entre o gelo e as partículas de água, tais como “riming” que pode produzir “graupel” ou granizo. Como regra geral, para o uso de grades com resolução maior do que 10 km, onde os movimentos verticais devem ser resolvidos, devem ser usados os esquemas contendo fase-mista.

Tabela I.1 – Opções de microfísica do modelo WRF.

Esquema	Número de Variáveis	Processo fase-gelo	Processo fase-mista
Kessler	3	N	N
Purdue Lin	6	S	Y
WSM3	3	S	N
WSM5	5	S	N
WSM6	6	S	Y
Eta GCP	2	S	Y
Thompson	7	S	Y

Nas simulações deste trabalho foi usado o esquema de momento único (“single-moment”) de três classes do WRF (WSM3). Este esquema (Hong *et al.* 2004) inclui sedimentação de gelo e outras novas parametrizações da fase-gelo revisadas a partir do esquema NCEP3 que compunha a primeira versão do WRF. A principal diferença dos outros esquemas é o uso de uma relação diagnóstica para a concentração do gelo que é baseada no conteúdo de massa do gelo em lugar da temperatura. Este esquema inclui três categorias de hidrometeoros: vapor, água nuvem/gelo, e chuva/neve. Este esquema é o chamado gelo-simples onde o gelo da nuvem e a água da nuvem são contados na mesma categoria. Eles são diferenciados pela temperatura, já que gelo de nuvem só pode existir quando a temperatura for menor ou igual ao ponto de congelamento, em caso contrário a água de nuvem poderá existir. A mesma condição é aplicada à chuva e a neve. Embora a fase-gelo esteja incluída, este esquema é considerado suficientemente eficiente para uso nos modelos operacionais.

I.2 – Parametrização de Cúmulos

Estes esquemas são responsáveis pelos efeitos sub-grade que ocorrem nas nuvens convectivas rasas e/ou profundas. Estes esquemas tentam representar os fluxos verticais devidos aos movimentos ascendentes e descendentes, não resolvidos na escala das grades do modelo, e compensar os movimentos do lado de fora das nuvens. Estes esquemas operam somente em colunas individuais onde o esquema é disparado e fornecem os perfis verticais de aquecimento e umidade. A tabela I.2 mostra as características básicas das opções de parametrização de cúmulos disponíveis no WRF.

Tabela I.2 – Opções de parametrização de cúmulos no modelo WRF.

Kain-Fritsch	S	Fluxo de massa	Remoção da CAPE
Betts-Miller-Janjic	N	Ajustamento	Ajustamento da sondagem
Grell-Devenyi	S	Fluxo de massa	Vários

A parametrização de cúmulos teoricamente só é válida para grades com baixa resolução (por exemplo, com mais de 10 km de espaçamento), quando é necessário liberar calor latente em uma escala realística de tempo na coluna convectiva. Algumas vezes esses esquemas têm sido úteis também para ajudar a disparar a convecção em aplicações com grades de 5-10 km de espaçamento. Em geral, eles não devem ser usados quando o modelo pode resolver os vórtices turbulentos (grades com espaçamento menores ou iguais a 5 km).

As simulações foram feitas usando-se o esquema de Grell & Devenyi (2002) que introduziram um esquema de cúmulos que usa a técnica de conjunto (“ensemble cumulus”) no qual a efetividade dos cúmulos tem esquemas múltiplos e variam em cada caixa de grade do modelo, sendo o resultado final a média encontrada que é então passada para o modelo. Em princípio a média pode ser ponderada para otimizar o esquema, mas no esquema têm sido usados valores iguais para os pesos. Os esquemas são do tipo fluxo de massa, mas com diferentes parâmetros para nas correntes ascendentes e descendentes do entranhamento e desentranhamento. Essas diferenças no controle estático são combinadas com diferenças no controle dinâmico, que é o método de determinar o fluxo de massa na nuvem. Os controles de fechamento dinâmico podem ser baseados na energia potencial convectiva disponível (CAPE ou função trabalho da nuvem), na velocidade vertical nos níveis baixos ou na convergência de umidade. Aqueles baseados na CAPE ou equilibram a taxa de variação da CAPE ou relaxam a CAPE segundo valores climatológicos, ou ainda removem a CAPE na escala de tempo da convecção. O fechamento segundo a convergência de umidade balanceia a chuva da nuvem com a advecção vertical de umidade integrada. Outro controle é aquele feito sobre o mecanismo de disparo. O uso das diversas formas de controle permite a criação de um conjunto com 144 membros.

Para fins da presente discussão, é conveniente para compartimentalizar o regime de KF em três partes: 1) o função de gatilho de convecção, 2) a formulação de fluxo de massa, e 3) as hipóteses de encerramento.

I.3 – Camada Superficial

Os esquemas da camada limite calculam as velocidades de atrito e os coeficientes de trocas que permitem o cálculo do aquecimento da superfície e dos fluxos de umidade pelos modelos de solo-superfície e do estresse no esquema da camada limite planetária. Sobre superfícies de água os fluxos de superfície e campos diagnósticos de superfície são computados no próprio esquema de camada superficial. Os esquemas não apresentam tendências, apenas a

informação dependente da estabilidade proveniente da camada superficial para os esquemas de solo-superfície e da CLP (camada limite planetária). Atualmente, cada opção de camada superficial é relacionada com determinadas opções de camada limite.

O esquema usado nesta pesquisa é o esquema de camada superficial do modelo ETA (Janjic, 1996, 2002) e é baseado na teoria da similaridade (Monin e Obukhov, 1954). O esquema inclui parametrizações de subcamadas viscosas. Sobre a superfície da água, a subcamada viscosa é explicitamente parametrizada segundo Janjic (1994). Sobre o solo, os efeitos da subcamada viscosa são levados em conta através da variável “altura de rugosidade” para temperatura e umidade, como proposto por Zilitinkevich (1995). A correção de Beljaars (1994) é aplicada para evitar singularidades no caso de camadas superficiais instáveis e velocidades de vento que caíam bruscamente. Os fluxos superficiais são computados por um método iterativo. Este esquema de camada superficial deve ser usado em conjunto com o esquema de CLP Eta (Mellor-Yamada-Janjic) e às vezes é chamado de esquema superficial MYJ.

I.4 – Modelo de Solo-Superfície

Os modelos de solo-superfície (MSS) usam a informação meteorológica do esquema de camada superficial, a forçante radiativa do esquema de radiação e a forçante de precipitação dos esquemas de microfísica e convecção, combinadas com uma informação interna de variáveis de estado do solo e propriedades solo-superfície, para disponibilizar fluxos de calor e umidade em pontos sobre o solo e sobre a água ou o gelo. Estes fluxos geram uma condição de fronteira inferior para o transporte vertical realizado nos esquemas de CLP (ou no esquema vertical de difusão, no caso onde o esquema de CLP não funciona, como no modo *large-eddy*). Os MSS têm vários graus de sofisticação ao lidar com fluxos de temperatura e umidade em múltiplos níveis de solo e podem também lidar com os efeitos de vegetação, raízes, dossel vegetativo e previsão de cobertura de neve. O MSS não é tendencioso, mas atualiza as variáveis de estado do solo, que incluem a temperatura do solo, perfil de temperatura do solo, perfil de umidade do solo, cobertura de neve e propriedades do dossel vegetativo. Não há interação horizontal entre pontos vizinhos no MSS, possibilitando a execução deste modelo em vários pontos de grade concomitantemente.

O MSS usado neste trabalho é o Noah que é o sucessor do OSU descrito por Chen e Dudhia (2001). O esquema foi desenvolvido em conjunto por NCAR e NCEP e é um código

unificado para propósitos de pesquisa e operação, sendo quase idêntico ao código do modelo NAM de mesoescala do NCEP. Ele é consistente com campos de solo dependentes do tempo disponíveis nos dados de análise. Este é um modelo de temperatura e umidade do solo em 4 camadas com previsão de umidade canopy no dossel vegetativo e cobertura de neve. Inclui zona da raiz, evapotranspiração, drenagem do solo e *runoff*, levando em conta as categorias de vegetação, fração mensal de vegetação e textura do solo. O esquema disponibiliza fluxos de calor latente e sensível para o esquema de condição de contorno. Ele ainda prevê gelo no solo e efeitos fracionais de cobertura de gelo, tem um tratamento urbano melhorado e considera propriedades de emissividade superficial, implementadas desde o esquema OSU.

I.5 – Camada Limite Planetária (CLP)

Foi usado o esquema de Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) para a parametrização de turbulência na CLP e na atmosfera livre (Janjic, 1990, 1996, 2002) que representa uma implementação não singular do modelo de turbulência Mellor-Yamada Level 2.5 (Mellor & Yamada, 1982) para todos os regimes turbulentos da atmosfera. Nesta implementação, um limite superior é imposto numa escala mestre de comprimento. Este limite superior depende do TKE, assim como a flutuabilidade e o cisalhamento do fluxo em questão. Na região instável, a forma funcional do limite superior é derivado dependendo se a geração de TKE for não-singular no caso de turbulência crescente. Na região estável, o limite superior é derivado dependendo que a razão da variância do desvio da velocidade vertical e o TKE não seja menor do que aquele correspondente no regime de turbulência zero (*vanishing turbulence*). A equação diferencial de produção ou dissipação de TKE é resolvida iterativamente. As constantes empíricas também foram revisadas (Janjic, 1996, 2002).

I.6 – Radiação Atmosférica

I.6.1 – Modelo de Transferência de Radiação Rápida de Onda Longa (RRTM)

O RRTM, tirado do modelo MM5, é baseado em Mlawer *et al.* (1997) e é um sistema de banda espectral usando o método “*correlated-k*”. Ele utiliza tabelas pré-determinadas para representar precisamente os processos de onda longa em relação a vapor de água, ozônio, CO₂ e traços de gases (se houver), bem como contabilizar a profundidade da nuvem ótica.

I.6.2 – Onda curta do MM5 (Dudhia)

Este sistema é baseado em Dudhia (1989) e é retirado do modelo MM5. Ele tem uma integração descendente simples com o fluxo solar, que representa espalhamento em ar claro, absorção de água (Lacis & Hansen, 1974), albedo e absorção das nuvens. Ele também utiliza as tabelas de Stephens (1978).